

ANDERSON SANTOS DA SILVA

TESE

**ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO
DADOS AGROMETEOROLÓGICOS E IMAGENS DO SENSOR MODIS**

**RECIFE – PE
ABRIL DE 2016**

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA RURAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO
DADOS AGROMETEOROLÓGICOS E IMAGENS DO SENSOR MODIS**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco como exigência para obtenção do título de doutor.

Autor: Anderson Santos da Silva

Orientador: Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura

Co - orientador: Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes

RECIFE – PE
ABRIL DE 2016

Ficha catalográfica

S856e Silva, Anderson Santos da.
Estimativa de produtividade da cana-de-açúcar utilizando dados agrometeorológicos e imagens do sensor MODIS / Anderson Santos da Silva. – Recife, 2016.
90 f. : il.

Orientador: Geber Barbosa de Albuquerque Moura.
Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia Agrícola, Recife, 2016.

Inclui referências.

1. Índices de vegetação. 2. Precipitação. 3. Área foliar.
I. Moura, Geber Barbosa de Albuquerque, orientador. II. Título

CDD 630

**ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO
DADOS AGROMETEOROLÓGICOS E IMAGENS DO SENSOR MODIS**

Tese defendida e aprovada em 26 de fevereiro de 2016 pela banca examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Geber Barbosa de Albuquerque Moura (UFRPE)

Examinadores:

Prof. Dr. Ranyére Silva Nóbrega (UFPE)

Examinador externo

Prof. Dr. Anthony Wellington Almeida Gomes (UFRPE)

Examinador externo

Prof. Dr. Fabrício Marcos Oliveira Lopes (UFRPE)

Examinador interno

Prof^a Dr^a Cristina Rodrigues Nascimento (UFRPE)

Examinador interno

Prof. Dr. Ênio Farias França e Silva (UFRPE)

Examinador interno

A Deus;

A meus pais, Aderson e Uilma;

A meu irmão.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal Rural de Pernambuco por me permitir momentos tão importantes e de grande satisfação.

À Capes, pela bolsa concedida e pelo financiamento da bolsa de pesquisa durante boa parte do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de estudos e pelo apoio financeiro durante a pesquisa.

À Agroindústria do Vale do São Francisco (AGROVALE), pela disponibilidade dos dados essenciais e área de estudo para desenvolvimento da pesquisa. Em especial ao Sr. Pereira, pela ajuda na impressão dos dados estatísticos; ao consultor Dr^o Monteiro, pelo ensinamento e escolha da área em estudo; ao Departamento Agrícola e de Topografia e àqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram com o trabalho.

À pesquisadora Dr^a Magna Soelma, da Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA) do Semiárido junto ao Centro de Pesquisas Agropecuárias do Trópico Semiárido, pela disponibilidade dos dados agrometeorológicos.

A Deus, por me acompanhar e me dar forças quando muitas vezes quis fraquejar.

A meus pais, Aderson Marques e Uilma Maria, por terem participado de perto de tudo que vivi, por terem me ouvido, ajudado, dando-me força e carinho, por me amarem.

A meu avô Francisco (*in memoriam*) que contribuiu em vários momentos de minha vida e com quem tiver a oportunidade de conviver e aprender muitas coisas; obrigado vovô, por tudo.

A minha avó, Celina, que acompanha esta longa caminhada cheia de obstáculos e me dá a maior força pessoal para crescer na vida.

A meu irmão, Gustavo, por dividir comigo os bons e maus momentos desta caminhada.

A meu primo, Felipe, meu companheiro de vida.

A Sandrine, minha namorada, pelo companheirismo, compreensão, carinho, dedicação, confiança e pela felicidade de tê-la perto de mim neste momento.

A todos da minha família, em especial a minha tia Ana Lúcia, que sempre me acompanhou e torce por mim, por contribuir diretamente para a realização deste trabalho.

A Dr^a Patrícia pelo acompanhamento desde o início de carreira acadêmica e profissional, com seus conselhos e orientações de vida buscando sempre o melhor para mim.

Ao Prof. Dr. Geber Barbosa, pela paciência, amizade, compreensão, orientação tanto profissional como pessoal e disposição para ajudar.

Ao Prof. Dr. Fabrício Lopes, pela co-orientação, amizade, ensinamentos e grande contribuição na execução deste trabalho.

Ao meu amigo Prof. Msc. Swami (*in memoriam*) que em vários momentos dessa caminhada foi possível compartilhar ensinamentos e companheirismo além, claro, das inúmeras brincadeiras: obrigado Swami.

Aos professores, Dr. Ranyére Silva Nóbrega, Dr. Ênio Farias França e Silva e Dr. Anthony Wellington Almeida Gomes pela disponibilidade de participação na banca avaliadora.

Aos suplentes da banca, Prof^a Dr^a Cristina Rodrigues Nascimento, pela disponibilidade oferecida.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola da UFRPE (PPGEA), pela oportunidade da realização do doutorado.

Aos professores da UFRPE, que contribuíram para minha a formação, em especial aos professores do Departamento em Tecnologia Rural (DTR).

A todos os amigos da UFRPE, em especial a Allan, Diogo, Miguel, Rochelle, Raquele, Jucycléia, Hammady, Nadielan, Taís, Robertson, Wellington, Jairo, Breno, Manuel (secretário do PPGEA) fundamentais nesta jornada não só pelo convívio mas também pela amizade.

Ao Dante, sua esposa Socorro, seu filho Gabriel (o Gabgol) e Claudiane, pelo convívio, pela disposição e por todo apoio prestado desde o início do trabalho quando cheguei em Juazeiro-BA, importantes e fundamentais em meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos meus amigos da Unidade Acadêmica de Garanhuns, Antônio Ricardo, Anthony, Hudson e Tânia.

Finalmente, a todas as pessoas que contribuíram, de alguma forma, para o meu sucesso durante este Curso.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XIV
RESUMO.....	XV
ABSTRACT.....	XVI
1. Introdução.....	17
2. Objetivos.....	20
2.1. Objetivo geral.....	20
2.2. Objetivos específicos.....	20
3. Hipóteses.....	21
4. Revisão de literatura.....	22
4.1. A cultura da cana-de-açúcar.....	22
4.1.1. Fenologia da cana-de-açúcar.....	23
4.1.2. Ambiente de cultivo da cultura da cana-de-açúcar.....	24
4.1.3. Condicionantes agrometeorológicos para a produtividade da cana-de-açúcar.....	25
4.1.3.1. Disponibilidade hídrica.....	25
4.1.3.2. Temperatura e umidade do ar.....	26
4.1.3.3. Radiação solar.....	27
4.1.3.4. Vento.....	28
4.1.3.5. Fotoperíodo.....	28
4.2. Sensoriamento aplicado à agricultura.....	29
4.2.1. Sensor MODIS.....	30
4.2.2. Índices de vegetação.....	31
4.2.2.1. Produto MOD13.....	32
4.2.2.2. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI.....	32
4.3. Geoprocessamento e Sistema de Informação Geográfica.....	33
4.4. Modelos matemáticos.....	34
4.4.1. Modelos de estimativa da produtividade agrícola.....	35
4.4.2. Modelo agrônômico.....	36

4.4.3.	Modelo agrometeorológico.....	36
4.4.4.	Modelo agrometeorológico-espectral.....	37
5.	Material e métodos.....	38
5.1.	Área de estudo.....	38
5.2.	Dados de produtividade anual.....	39
5.3.	Dados meteorológicos.....	40
5.4.	Balanço hídrico climatológico sequencial mensal.....	41
5.5.	Dados espectrais.....	42
5.5.1.	Ferramenta de projeção geográfica MODIS – MRT.....	42
5.5.2.	Índice de vegetação da diferença normalizada – NDVI.....	43
5.5.3.	Fração de cobertura do solo – FC.....	43
5.5.4.	Índice de área foliar – IAF.....	43
5.6.	Calibração dos modelos estatísticos de estimativa.....	44
5.6.1.	Modelo agrometeorológico.....	44
5.6.2.	Modelo espectral.....	45
5.6.3.	Modelo agrometeorológico-espectral.....	45
5.7.	Estimativa pelos técnicos da usina.....	45
5.8.	Análises estatísticas.....	46
6.	Resultados e discussão.....	49
6.1.	Balanço hídrico climatológico sequencial mensal.....	49
6.2.	Calibração dos modelos estatísticos de estimativas.....	52
6.2.1.	Modelo agrometeorológico.....	52
6.2.2.	Modelo espectral.....	57
6.2.3.	Modelo agrometeorológico-espectral.....	62
6.3.	Validação dos modelos estatísticos de estimativas.....	67
7.	Conclusões.....	75
8.	Referências bibliográficas.....	76
	Apêndice A.....	84
	Apêndice B.....	88
	Apêndice C.....	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Produção de cana-de-açúcar no Brasil para o ano de 2013.....	22
Figura 2 -	Fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar.....	23
Figura 3 -	Localização das áreas de cultivo e estudo da AGROVALE, no município de Juazeiro-BA.....	38
Figura 4 -	Estação Agrometeorológica Automática instalada na Fazenda Brasil Uvas, em Juazeiro – BA.....	41
Figura 5 -	Extrato do cenário hídrico dos anos-safra de 2005/2006 a 2008/2009.	49
Figura 6 -	Extrato do cenário hídrico dos anos-safra de 2009/2010 a 2011/2012.	50
Figura 7 -	Modelo agrometeorológico (MA) e da estimativa da usina com os valores observados em relação aos valores estimados.....	54
Figura 8 -	Variação percentual da produtividade real e a estimada pelo modelo agrometeorológico (MA).....	56
Figura 9 -	Variação percentual da produtividade real e a estimada pelos técnicos da usina.....	57
Figura 10 -	Modelo espectral (ME) e da estimativa da usina com os valores reais em relação aos valores estimados.....	59
Figura 11 -	Variação percentual da produtividade real e a estimada pelo modelo espectral (ME).....	61
Figura 12 -	Variação percentual da produtividade real e a estimada pelos técnicos da usina.....	61
Figura 13 -	Modelo agrometeorológico-espectral (MAE) e da estimativa da usina com os valores reais em relação aos valores estimados.....	64
Figura 14 -	Variação percentual da produtividade real e a estimada pelo modelo agrometeorológico (MAE).....	66
Figura 15 -	Variação percentual da produtividade real e a estimada pelos técnicos da usina.....	67
Figura 16 -	Produtividade agrícola real e a estimada pelo modelo agrometeorológico (MA).....	70
Figura 17 -	Produtividade agrícola real e a estimada pelo modelo espectral (ME).....	71

Figura 18 -	Produtividade agrícola real e a estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral (MAE).....	72
Figura 19 -	Produtividade agrícola real e a estimada pelos técnicos da usina.....	74
Figura A1 -	Extrato do cenário hídrico do ano de 2005/2006.....	84
Figura A2 -	Extrato do cenário hídrico do ano de 2006/2007.....	84
Figura A3 -	Extrato do cenário hídrico do ano de 2007/2008.....	85
Figura A4 -	Extrato do cenário hídrico do ano de 2008/2009.....	85
Figura A5 -	Extrato do cenário hídrico do ano de 2009/2010.....	86
Figura A6 -	Extrato do cenário hídrico do ano de 2010/2011.....	86
Figura A7 -	Extrato do cenário hídrico do ano de 2011/2012.....	87
Figura B1 -	Mapas temáticos do NDVI da área de estudo para os anos-safra de 2005/2006 a 2009/2010.....	88
Figura B2 -	Mapas temáticos do NDVI da área de estudo para os anos-safra de 2010/2011 a 2011/2012.....	89
Figura C1 -	Mapas temáticos do NDVI da área de estudo para os anos-safra de 2004/2005, 2013/2014 e 2014/2015.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Características gerais do satélite Terra e do sensor MODIS.....	31
Tabela 2 -	Dados de produtividade da cana-de-açúcar no campo Dominicana para os anos-safra de 1998/1999 a 2014/2015.....	40
Tabela 3 -	Classificação do desempenho dos métodos de estimativas da produtividade agrícola pelo índice c.....	48
Tabela 4 -	Produtividade agrícola ($t\ ha^{-1}$) em função do cenário hídrico para os anos-safra de 2005/2006 a 2011/2012.....	51
Tabela 5 -	Coefficientes do modelo agrometeorológico (MA) com as respectivas probabilidades de erro (p), correlações lineares (r), índice de concordância de Willmott (d) e Erro Padrão de estimativa.....	52
Tabela 6 -	Resultados dos valores reais X valores estimados para o modelo agrometeorológico (MA) para os anos-safra de 2005/2006 a 2011/2012.....	53
Tabela 7 -	Valores da produtividade real ($t\ ha^{-1}_{real}$) e da produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico (MA) e da usina, com suas respectivas diferenças média absoluta (DMA), diferença média relativa (DMR) e raiz da diferença quadrática média (RDQM), para os anos-safra estudados.....	55
Tabela 8 -	Coefficientes do modelo espectral (ME) com as respectivas probabilidades de erro (p), correlações lineares (r), índice de concordância de Willmott (d) e Erro Padrão de estimativa.....	57
Tabela 9 -	Resultados dos valores reais X valores estimados para o modelo espectral (ME) para os anos-safra de 2005/2006 a 2011/2012.....	58
Tabela 10 -	Valores da produtividade real ($t\ ha^{-1}_{real}$) e da produtividade estimada pelo modelo espectral (ME) e da usina, com suas respectivas diferenças média absoluta (DMA), diferença média relativa (DMR) e raiz da diferença quadrática média (RDQM), para os anos-safra estudados.....	60
Tabela 11 -	Coefficientes do modelo agrometeorológico-espectral (MAE) com as respectivas probabilidades de erro (p), correlações lineares (r), índice	

	de concordância de Willmott (d) e Erro Padrão de estimativa.....	62
Tabela 12 -	Resultados dos valores reais X valores estimados para o modelo agrometeorológico-espectral (MAE) para os anos-safra de 2005/2006 a 2011/2012.....	63
Tabela 13 -	Valores da produtividade real ($t\ ha^{-1}_{real}$) e da produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral (MAE) e da usina, com suas respectivas diferenças média absoluta (DMA), diferença média relativa (DMR) e raiz da diferença quadrática média (RDQM), para os anos-safra estudados.....	65
Tabela 14 -	Valores da produtividade agrícola (toneladas por hectare) calculada com os diferentes modelos para os anos-safra de 2004/2005, 2013/2014 e 2014/2015.....	68
Tabela 15 -	Valores da produtividade real ($t\ ha^{-1}_{real}$) e das produtividades estimadas pelos modelos: agrometeorológico (MA), espectral (ME), agrometeorológico-espectral (MAE) e da usina, com suas respectivas diferenças média absoluta (DMA), diferença média relativa (DMR) e raiz da diferença quadrática média (RDQM), para os anos-safra de 2004/2005, 2013/2014 e 2014/2015.....	69
Tabela 16 -	Correção de safra pelo modelo agrometeorológico (MA).....	70
Tabela 17 -	Correção de safra pelo modelo espectral (ME).....	72
Tabela 18 -	Correção de safra pelo modelo agrometeorológico-espectral (MAE)....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

t ha⁻¹	Tonelada por hectare
IP	Irrigação mais precipitação (mm)
T	Temperatura do ar (°C)
DEF	Déficit de saturação de vapor do ar (hPa)
N	Fotoperíodo (horas)
R_g	Radiação global (W m ⁻²)
NDVI	Índice de vegetação por diferença normalizada
mm	Milímetro
° C	Graus Celsius
e_a	Pressão parcial de vapor d'água (hPa)
e_s	Pressão de saturação de vapor d'água (hPa)
UR	Umidade relativa do ar (%)
FC	Fração de cobertura do solo
IAF	Índice de área foliar
MAE	Modelo agrometeorológico-espectral
ME	Modelo espectral
MA	Modelo agrometeorológico
Y_i'	Índice de produtividade agrícola estimada (t ha ⁻¹)
Y_i	Índice de produtividade agrícola observada ou real (t ha ⁻¹)
ρ	Reflectância espectral
ε	Resíduo dos modelos
ET_o	Evapotranspiração de referencia (mm)
ET_r	Evapotranspiração real (mm)
NC	Níveis de cinza

ESTIMATIVA DE PRODUTIVIDADE DA CANA-DE-AÇÚCAR UTILIZANDO DADOS AGROMETEOROLÓGICOS E IMAGENS DO SENSOR MODIS

RESUMO

Esta pesquisa baseou-se na avaliação de produtividade agrícola estimada e observada em uma área de cultivo comercial de cana-de-açúcar localizada na Agroindústria do Vale do São Francisco – AGROVALE S.A., Juazeiro – BA, sertão nordestino. Novos modelos de estimativas de produtividades foram obtidos por regressão linear múltipla utilizando-se, como variáveis de entrada: a irrigação, a precipitação, a temperatura média do ar, o déficit de saturação de vapor do ar, o fotoperíodo, o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), o índice de área foliar (IAF) e a fração de cobertura do solo (FC). Para obtenção desses modelos utilizou-se o programa estatístico Statística versão 10. Além disso, os meteorológicos foram obtidos na estação meteorológica automática instalada na Fazenda Brasil Uvas, em Juazeiro – BA sendo elas: precipitação, temperatura, umidade relativa, evapotranspiração, pressão atual de vapor e pressão de saturação de vapor. Os dados de rendimento agrícola e parâmetros inerentes ao desenvolvimento da cultura foram disponibilizados pelo Departamento Agrícola da usina AGROVALE. Os dados espectrais: NDVI, IAF e FC foram extraídos de produtos derivados de imagens orbitais do sensor MODIS (*Espectrorradiômetro Imageador de Resolução Moderada*). Os dados para validação dos modelos também foram obtidos nas mesmas fontes citadas anteriormente. Os dados foram avaliados por meio do cálculo do erro médio absoluto e do erro médio relativo ou percentual. A comparação dos valores observados e estimados de produtividades mostra que o modelo agrometeorológico-espectral (MAE) apresentou as menores e melhores diferenças médias relativas com uma variação média de 0,34%, seguido do modelo agrometeorológico (MA) com uma variação média de 1,37% e por último o modelo espectral (ME) apresentou as maiores diferenças médias relativas, quando comparado com os outros dois modelos obtendo uma variação média de 6,58%, aproximando-se mais da estimativa feita pelos técnicos da usina que apresentou variação média de 6,75%. Na validação dos modelos para o ano-safra de 2004/2005 o espectral superou os agrometeorológico e o agrometeorológico-espectral com diferenças médias relativas na ordem de 5,05% enquanto nos demais modelos as diferenças foram de 15,11% e 16,19%, refletindo numa produtividade de 93,05 t ha⁻¹ contra 83,19 t ha⁻¹ e 82,13 t ha⁻¹ dos modelos agrometeorológicos e agrometeorológico-espectral, respectivamente, para uma produtividade observada de 98 t ha⁻¹. Logo após a safra de 2011/2012 ocorreu uma renovação de plantio com nova variedade, fisiologia diferenciada e, conseqüentemente, um poder produtivo distinto e a partir da safra de 2013/2014 os modelos subestimaram a produtividade quando comparadas com o real. A estimativa feita pelos técnicos da usina baseada no desenvolvimento da cultura desde o plantio até próximo da colheita, apresentou resultados satisfatórios assim como os modelos testados.

Palavras-chaves: índices de vegetação, precipitação, área foliar

YIELD ESTIMATION OF SUGARCANE BASED ON AGROMETEOROLOGICAL DATA AND MODIS SENSOR IMAGES

ABSTRACT

This research is based on estimated and observed agricultural productivity in an area of commercial sugarcane production located at São Francisco's Agroindustry – AGROVALE S.A., Juazeiro – BA, Brazilian northeast. The new yield estimation models were obtained by multiple linear regression, in which the inputs variables were: irrigation, precipitation, average air temperature, vapor saturation deficit of the air, photoperiod, normalized difference vegetation index (NDVI), leaf area index (LAI) and fractional soil cover (FC). To obtain these models, it was used the statistics program *Statística* version 10. Furthermore, the meteorological data were obtained from an automatic weather station located at the Farm Brasil Uvas, Juazeiro – BA such as: precipitation (mm), temperature (°C), relative humidity (%), evapotranspiration (mm), current vapor pressure (hPa) and saturation vapor pressure (hPa). The crop yield data and parameters related to crop development were obtained from AGROVALE Agriculture Department. The spectral data, NDVI, IAF and FC, were extracted from MODIS sensor images (*Spectroradiometer Imager Moderate Resolution*). The data used to models validation were obtained from the same sources previously mentioned. The data were analyzed by mean absolute error (DMA) and mean relative error (DMR). The comparison of yield observed and estimated values showed that the spectral agrometeorological model (SAM) presented the lower and better mean relative error (DMR) with a mean variation of 0.34 %, followed by agrometeorological model with a mean variation of 1.37 % and, finally, the spectral model presented larger mean relatives errors in comparison with other two models, showing a mean variation of 6.58%, approaching AGROVALE's technicians estimation that presented a mean variation of 6.75%. At the validation's model for the 2004/2005 crop year, the spectral surpassed the agrometeorological and agrometeorological spectral with average relative errors of 5.05%, while for other models the difference were 15.11% and 16.19%, reflecting a productivity of 93.05 t ha⁻¹ versus 83.19 t ha⁻¹ and 82.13 t ha⁻¹ of agrometeorological and agrometeorological-spectral models, respectively, for an observed yield of 98 t ha⁻¹. Soon after the 2011/2012 years crop there was a planting renovation with a new variety, with different physiology and consequently a distinct productive power and, from 2013/2014 crop year, the models underestimated the productivity compared to the real. The estimate made by the technicians, based on the crop development since planting until next harvest, showed satisfactory results as well as the tested models.

Keywords: vegetation indexes, precipitation, leaf area

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o principal produtor atual de cana-de-açúcar do mundo. É responsável por mais da metade do açúcar comercializado no mundo; o País deverá alcançar uma taxa média no aumento da produção de 3,25%, até 2018/19 e colher 47,34 milhões de toneladas do produto que corresponde a um acréscimo de 14,6 milhões de toneladas em relação ao período 2007/2008. Para as exportações o volume previsto para 2019 é de 32,6 milhões de toneladas (MAPA, 2012).

Os Estados de São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná, Alagoas e Pernambuco, representam 91,9% da produção nacional. Nos demais Estados produtores as áreas são menores com representações abaixo de 3%. A área cultivada com cana-de-açúcar que será colhida e destinada à atividade sucroalcooleira na safra 2014/15 está estimada em 9.130,1 mil hectares, distribuídos em todos os Estados produtores.

A previsão do total de cana moída na safra 2014/15 será de 671,69 milhões de toneladas com aumento de 2% em relação à safra 2013/14, que foi de 658,82 milhões de toneladas significando que a quantidade que será moída deve ser 12,87 milhões de toneladas a mais que a moagem da safra anterior. A produtividade média brasileira está estimada em 73,57 t ha⁻¹ (Toneladas de Cana por Hectare), 1,6% menor que na safra 2013/14, que foi de 74,77 t ha⁻¹.

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) vem sendo cultivada em boa parte do semiárido brasileiro. Nesta região a cultura apresenta alta produção de biomassa, como resposta ao clima local e à utilização de tecnologias de irrigação no sistema de produção (Silva et al., 2011).

Geralmente, a estimativa de produtividades agrícolas em áreas canavieiras de determinada usina é feita antes do início da colheita por técnicos que percorrem os canaviais e observam o desenvolvimento das lavouras atribuindo-lhes valores de produtividade com base na experiência adquirida e em informações de safras anteriores; assim, esse tipo de análise pode ser tendencioso e não permite averiguar os erros envolvidos.

Deste modo é extremamente importante entender a variabilidade temporal e espacial dos parâmetros de produtividade em plantações de cana-de-açúcar para aumentar a eficiência de uso da água e a produção, principalmente na região semiárida onde os recursos hídricos são escassos.

Com o advento de informações geradas por técnicas de sensoriamento remoto, várias possibilidades, tais como o emprego de imagens de satélite aliadas aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Sistemas de Posicionamento Global (GPS), têm sido apontadas como

possíveis de serem empregadas na previsão de safras, na estimativa de área cultivada e nos modelos de estimativa de produtividade das culturas.

As imagens de NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) oriundas do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) bordo dos satélites Terra e Aqua, fornecem comparações consistentes de dados temporais e espaciais das condições da vegetação de modo a monitorar a atividade fotossintética da vegetação em suporte à detecção de mudanças e interpretações biofísicas e da fenologia com largura de varredura de aproximadamente 2340 km (Latorre et al. 2003). Contido no produto MOD13Q1, o NDVI é calculado a partir de séries temporais de 16 dias das observações multiangulares da reflectância corrigida do efeito atmosférico, com resolução de 250 m (MODIS, 2013).

A técnica de regressão múltipla utilizando condições meteorológicas pode proporcionar a quantificação e simulação da produtividade agrícola numa cultura qualquer trazendo informações inerentes sobre a variabilidade espacial e temporal dos fatores climáticos que vêm influenciar esses rendimentos agrícolas. Esta metodologia é bastante prática e tem apresentado grau aceitável de acurácia (Marcari, 2015).

Através de séries históricas de dados climáticos e dados orbitais como, por exemplo, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, evapotranspiração, índices de vegetação, são considerados dados de entrada dos modelos agrometeorológicos-espectrais na estimativa de produtividades agrícolas; além de que é possível interpretar o perfil ou risco climático em determinada área de estudo e cultura agrícola.

A viabilidade do desenvolvimento de um modelo agrometeorológico-espectral para a estimativa da produtividade da cultura do milho em Moçambique, África, região com características edafoclimáticas semelhantes ao do sertão nordestino, Malibana et al. (2012) observaram que os dados de NDVI do sensor MODIS (MOD13Q1) evidenciam potencialidades para explicar as variações no rendimento médio dos grãos de milho porém a resolução espacial do sensor para esta região de estudo foi um fator muito limitante já que um pixel da imagem equivale a uma área de 6,25 hectares e as áreas médias de exploração agrícolas em Moçambique estão na ordem de 1,5 hectares, ou seja, áreas agrícolas fragmentadas e distribuídas espacialmente em menor dispersão.

O NDVI é uma variável espectral inerente de um modelo agrometeorológico-espectral de grande importância possível de subsidiar no monitoramento de áreas vegetadas em condições naturais ou plantios comerciais, que podem estar susceptíveis à desertificação devido

ao uso ilimitado desses cenários aliados ao baixo índice pluviométrico, distribuição irregular das chuvas e longos períodos de seca.

O objetivo deste trabalho foi estabelecer um modelo de estimativa de produtividade de cana-de-açúcar utilizando técnicas de regressão linear múltipla, dados orbitais e meteorológico em áreas de cultivo da Agroindústria do Vale do São Francisco – AGROVALE S.A. no município de Juazeiro – BA.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi estabelecer um modelo de estimativa de produtividade de cana-de-açúcar utilizando-se técnicas de regressão linear múltipla, dados orbitais e meteorológico em áreas de cultivo da Agroindústria do Vale do São Francisco – AGROVALE S.A. no município de Juazeiro – BA.

2.2. Objetivos específicos

- i. Determinar a produtividade da cana-de-açúcar mediante o uso dos dados agrometeorológicos (modelo agrometeorológico);
- ii. Determinar a produtividade da cana-de-açúcar ao longo do tempo de exploração de informações da série temporal de imagens TERRA/MODIS em função da resposta dos dados espectrais do índice de vegetação NDVI (modelo espectral);
- iii. Relacionar a produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral com a produtividade observada e estimada pela Usina;
- iv. Elaboração de um modelo agrometeorológico-espectral adaptado às condições encontradas na área de estudo;
- v. Ajustar e validar o modelo agrometeorológico-espectral destinado à estimativa da produtividade da cana-de-açúcar;
- vi. Ajustar a produtividade estimada pelos modelos testados através de um fator de correção de safra quando necessário.

3. HIPÓTESES

- 3.1.** A utilização de informações temporais e espaciais obtidas a partir de séries de imagens do sensor MODIS/TERRA, pode fornecer subsídios para a estimativa da produtividade das áreas plantadas com cana-de-açúcar tornando os sistemas de monitoramento e previsão de safras da cultura mais objetiva.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. A cultura da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma planta monocotiledônea, alógama e perene, provavelmente originária da Indonésia e Nova Guiné, pertencente à família *Poaceae*. Seus atuais cultivares são híbridos interespecíficos sendo que nas constituições genéticas participam as espécies *S. officinarum*, *S. spontaneum*, *S. sinense*, *S. barberi*, *S. robustum* e *S. edule* (Neto et al., 2010).

Trata-se de uma planta de reprodução sexuada porém, quando cultivada comercialmente, é multiplicada assexuadamente por propagação vegetativa. É caracterizada pela inflorescência do tipo panícula, flor hermafrodita, caule em crescimento cilíndrico composto de nós e entrenós, folhas alternas, opostas, presas aos nós dos colmos, com lâminas de sílica em suas bordas e bainha aberta (Neto et al., 2010).

No cenário agrícola brasileiro a cultura da cana-de-açúcar tem participação expressiva pois é cultivada na maioria dos estados da República Federativa do Brasil devido a fáceis adaptabilidades das condições climáticas e de solos coincidentes com aquela região conforme ilustra a Figura 1. Em relação à época de plantio ou cultivo, que é um dos fatores que mais interferem no crescimento, a cultura da cana-de-açúcar é dividida em 3 diferentes épocas: cana de ano, cana de ano e meio e cana de inverno (UDOP, 2013).

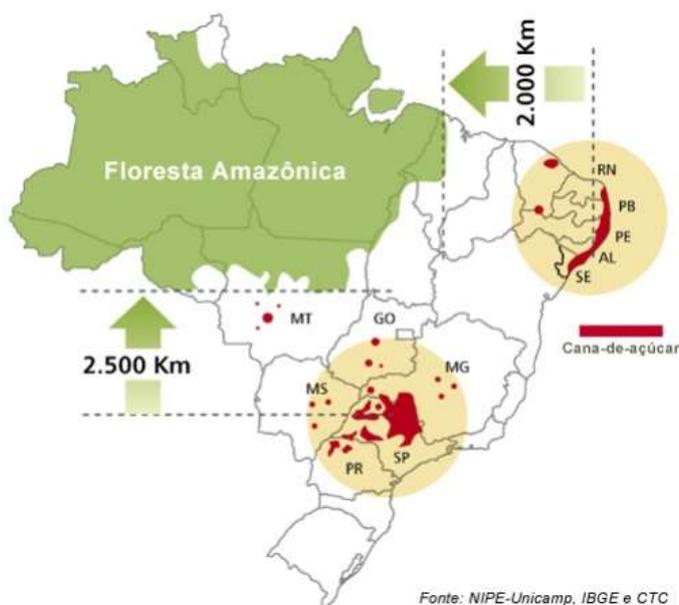


Figura 1. Produção de cana-de-açúcar no Brasil para o ano de 2013.

Hoje, se dispõe, no Brasil, de aproximadamente 460 unidades agroindústrias (entre usinas e destilarias) para processamento da cana-de-açúcar mas a região centro-sul do país que domina esta grande parcela produtiva, em especial o Estado de São Paulo tem participação significativa na cadeia produtiva desta cultura (UDOP, 2013).

4.1.1. Fenologia da cana-de-açúcar

A fenologia da cultura pode ser definida como o estudo dos eventos periódicos da vida de uma planta em função das suas reações e das adversidades condicionais de um ambiente.

Para Jadoski et al. (2010), as plantas não respondem similarmente ao desenvolvimento radicial, a brotação, perfilhamento e crescimento da parte aérea; algumas são capazes de se desenvolver satisfatoriamente em condições edáficas em que outras não conseguiriam; sendo assim, a fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo varia entre cultivares dentro de uma mesma espécie de acordo com o ciclo fenológico, havendo casos em que as diferenças entre cultivares são maiores que entre as espécies. Portanto e de acordo com a Figura 2, a compreensão da fisiologia de cada estágio do ciclo fenológico se mostra necessária para o estabelecimento de bons estandes para a cultura e, conseqüentemente, a obtenção de boas produtividades.

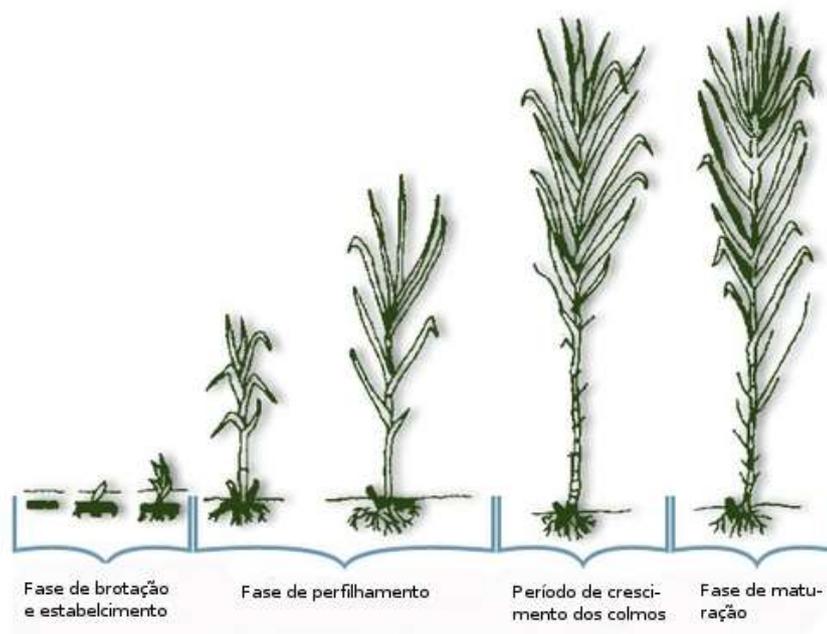


Figura 2: Fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar. **Fonte:** EMBRAPA

Durante as fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar cada estágio pode ser influenciado pelos fatores bióticos e abióticos, como: a época de plantio, temperatura, umidade, fertilidade do solo, variedade, incidência de pragas e doenças, competição por plantas daninhas, ou seja, o próprio manejo agrônômico.

4.1.2. Ambiente de cultivo da cultura da cana-de-açúcar

De acordo com Prado et al. (2007) é uma cultura exigente em alguns fatores ambientais no que diz respeito em função das condições físicas, hídricas, morfológicas, químicas e mineralógicas dos solos sob manejo adequado da camada arável em relação ao preparo, calagem, adubação, adição de vinhaça, torta de filtro e palha, do controle de ervas daninhas e pragas associadas com as condições da subsuperfície dos solos e ao clima (precipitação pluviométrica, temperatura, radiação solar, evaporação). Todas essas características exigentes são inerentes ao seu desenvolvido vegetativo, ou seja, fatores ideais para a planta atingir o máximo de sua biomassa verde e produção de uma planta vigorosa.

Os componentes do ambiente de cultivo têm uma representação significativa pela relação direta que a planta tem com a disponibilidade de água e com o volume de solo explorado pelas raízes; a fertilidade, como fonte primária de nutrientes para as plantas; textura, relacionada com os níveis de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica e disponibilidade hídrica e pela água, como parte da solução do solo, vital para a sobrevivência das plantas sendo, assim, a grande importância da soma dessas interações entre os atributos de superfície e subsuperfície (Prado et al. 2007).

A produção de cana-de-açúcar é altamente dependente de fatores fisiológicos, tratos culturais e fatores ambientais. Em relação aos fatores ambientais, o clima exerce papel fundamental cujas condições meteorológicas, como temperatura, precipitação e insolação durante os estádios fenológicos críticos, interferem significativamente na produtividade da cultura. Além disso, a radiação solar incidente interfere na sustentabilidade da planta através do perfilhamento, área foliar, produção de colmos e, conseqüentemente, na sua qualidade (André et al. 2010).

Esteves et al. (2012), analisaram, levando em consideração todos os estádios de desenvolvimento vegetativo e a precipitação na região de estudo durante o ciclo da cultura da cana-de-açúcar, que no saldo de radiação houve variação no consumo pelos componentes

principais do balanço de energia, em que o fluxo de calor latente respondeu por 53%, afetando positivamente o IAF, os 37% pelo fluxo de calor sensível e os 10% restantes pelo fluxo de calor no solo.

4.1.3. Condicionantes agrometeorológicos para a produtividade da cana-de-açúcar

4.1.3.1. Disponibilidade hídrica

Durante as fases fenológicas da cana-de-açúcar a variação dos eventos, implica, ao longo do desenvolvimento da cultura, em consumo hídrico diferenciado entre os estádios de desenvolvimento. A perda de água pela cultura durante seu ciclo vegetativo é função da área foliar, do estágio fenológico e da densidade do sistema radicular.

Fauconier e Bassereau (1970), observaram determinado canavial produzindo 100 toneladas de colmos por hectare, com fornecimento de cerca de 1500 mm de água, seja por chuva ou irrigação ao longo do ciclo recebendo, assim, 15000 toneladas de água por hectare. Assim, a quantidade de água contida em 100 toneladas de colmos varia entre 75 e 85 toneladas, concluindo, que para cada 150kg ou 200kg de água transpirada pelo canavial cerca de 1kg de matéria seca é sintetizada pela cultura.

A cana-de-açúcar responde mais à irrigação quando a suplementação é feita no primeiro terço do ciclo indicando maior exigência de água durante o período de crescimento (Shaw e Innes, 1965).

Santos (2005) verifica que o consumo hídrico da cultura da cana-de-açúcar varia em função do ciclo (cana planta ou soca), do estágio de desenvolvimento, das condições ambientais, da água disponível no solo e das variedades.

A cana-de-açúcar é tradicionalmente cultivada entre as latitudes 35° N a 35° S, com larga escala de adaptação. Em geral, o clima é o primeiro elemento a ser considerado devido à condição de estabilidade embora existam as variações sazonais e variabilidades climáticas que também são ponderadas. Os principais fatores que determinam o sucesso da cultura e sua exploração econômica são a temperatura do ar e a precipitação pluvial (Brunini, 2010).

A consequência da vasta adaptabilidade da cana-de-açúcar às condições climáticas adversas, que encontra suas melhores condições quando ocorre um período quente e úmido, porém com baixa temperatura e acima de 35° C, retarda o crescimento da planta. Em relação à

radiação solar por ser uma planta do tipo C4, com alta eficiência fotossintética e quanto maior for a incidência luminosa mais fotossíntese será realizado, pela cultura e, logicamente, maior seu desenvolvimento vegetativo e acúmulo de açúcares durante a fase de crescimento (Brunini, 2010).

Observada por Machado et al. (2009) a tolerância ao déficit hídrico é variável em função da cultivar e o estágio fenológico, concluindo que o déficit hídrico pode ter maiores ou menores influências na produtividade agrícola corroborando com outras pesquisas (Inman-Bamber e Smith, 2005; Silva et al., 2010).

Pensando em estratégias para minimizar esses efeitos negativos na produção agrícola e diminuir a quantidade de água usada via irrigação, Holanda et al. (2014) observaram que em meio à seleção de genótipos tolerantes e susceptíveis a seca foi possível diferenciar variedades em função da produção de matéria seca da parte aérea e raízes; assim, na hora do planejamento agrícola a importância desse estudo na distribuição varietal dentro de um ambiente de cultivo diversificado.

Práticas como a irrigação constituem uma das alternativas que vêm para reduzir os efeitos do déficit hídrico porém nem sempre é a técnica mais viável, seja por conta da disponibilidade de recursos hídricos, custo elevado de implantação e manutenção ou por questões ambientais, razão por que Vieira et al. (2013) avaliaram a melhor época para cessar a irrigação e perceberam que em função da época antecedente à colheita, houve perda na produtividade de até 26 t ha⁻¹. Quanto à seleção de genótipos tolerantes ao déficit hídrico, pode representar uma alternativa para diminuir a quantidade de água utilizada na irrigação mantendo ou aumentando a produtividade corroborando com Holanda et al. (2014).

4.1.3.2. Temperatura e umidade do ar

A temperatura é um dos fatores mais importantes na produção da cana-de-açúcar havendo grande número de publicações envolvendo limites térmicos para a cultura. De modo geral, pode-se admitir que a cana apresentasse queda expressiva na taxa de crescimento sempre que a temperatura do ar cai abaixo de 20°C e, conseqüentemente, diferindo taxas máximas quando submetida a temperaturas entre 30°C e 34°C, ocorrendo um estresse térmico sob condições de temperatura acima dos 35°C, com crescimento praticamente nulo, acima dos 38°C. Considera-se, também, que o crescimento da cana-de-açúcar estaciona ou se torna

praticamente nulo quando a temperatura do ar é inferior a valores entre 16°C e 18°C; para cada fase de desenvolvimento da cultura existe uma temperatura do ar ideal que influencia significativamente no crescimento vegetativo (Barbieri; Villa Nova, 1977; Doorembo; Kassan, 1979; Magalhães, 1987).

É importante lembrar que a temperatura do ar varia inversamente com a umidade relativa do ar, ou seja, quando uma cresce a outra decresce desde que na ausência de chuva ou de outro mecanismo que promova acréscimo significativo de vapor d'água na atmosfera (Vianello e Alves, 2012).

Cardozo et al. (2012) observaram uma relação inversamente proporcional entre a temperatura do ar e maturação da cana, com maiores coeficientes de correlação observados quando a temperatura do ar foi, em média, nos últimos 120 a 150 dias antes da amostragem.

Segundo Cardozo e Sentelhas (2013) a redução sazonal da temperatura do ar também afeta o processo de amadurecimento mas sua ação é menos intensa e requer mais tempo para afetar o acúmulo de açúcar.

Machado et al. (2013) observaram que a baixa temperatura e o déficit hídrico influenciam significativamente nas respostas fotossintéticas da cana-de-açúcar em relação à redução dos fatores difusivos, bioquímicos e fotoquímicos, ou seja, podendo induzir as panículas e a planta não está fisiologicamente bem.

No mesmo estudo, Guerra et al. (2014) constataram que altas temperaturas não afetaram a eficiência fotossintética das plantas de cana-de-açúcar. Todavia, enquanto induziu aumento da altura das plantas o diâmetro do colmo foi reduzido pois em temperaturas acima de 35°C o crescimento da cana é lento e praticamente nulo com temperaturas superiores aos 38°C (Barbieri e Villa Nova, 1981).

4.1.3.3. Radiação solar

A cana-de-açúcar é uma espécie com ciclo fotossintético do tipo C4, apresentando alta eficiência de conversão de energia radiante em energia química quando submetida a condições de elevada temperatura do ar e radiação solar intensa associadas à elevada disponibilidade de água no solo.

Cardozo (2012) estudou as relações entre a radiação solar (RS), a radiação líquida (RL), o fotoperíodo (N) e os padrões de maturação de algumas variedades de cana e observadas

relações inversamente proporcionais entre SR, NR e N e variáveis de qualidade da cana, como o total de conteúdo presente no suco (Brix) sólido, Pol e açúcar total recuperável (ATR) quando essas variáveis foram calculadas para 90 a 150 dias antes da amostragem.

Segundo Fauconier e Basserou (1970) canaviais cultivados em regiões com radiação solar intensa têm maior área foliar, folhas mais espessas e verdes, raízes mais desenvolvidas, tendendo a acumular mais matéria seca (açúcar e fibras) em detrimento da quantidade de água.

Em regiões tropicais e subtropicais, em particular a cana-de-açúcar mostra crescimento mais vigoroso no início do verão durante os dias mais longos e especialmente após as chuvas de verão que ocorrem no meio do dia, quando o céu se abre e a radiação solar intensifica. Nessas ocasiões, se associam todas as condições requeridas para altas taxas de crescimento, isto é, elevada disponibilidade hídrica no solo, altas temperaturas e radiação solar intensa. Além disso, folhas mais eretas, como observadas nos canaviais, permitem o adensamento das plantas maximizando o rendimento por área e explicando, em parte, os níveis de produtividade observados em condições de campo (Monteiro, 2009).

4.1.3.4. Vento

De acordo com Monteiro (2009) diferente dos demais elementos meteorológicos, o vento é uma componente horizontal caracterizado por sua velocidade e direção (com grande variação espaço-temporal) podendo deslocar verticalmente as massas de ar; assim, nos canaviais o vento exerce forte influência na produtividade, interferindo nas trocas gasosas entre a cobertura e a vegetação, seja elevando a transpiração das plantas, consequência da queda na resistência aerodinâmica ao transporte de vapor e CO₂, seja favorecendo a assimilação de CO₂, resultado da renovação das camadas de ar que envolve o dossel.

4.1.3.5. Fotoperíodo

Segundo Rodrigues (1995) quando o assunto em questão é a fenologia, o fotoperíodo exerce papel fundamental na indução do florescimento da cana-de-açúcar influenciando significativamente no desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar explicando a variação no diâmetro e alongamento do colmo, que aumentam com fotoperíodos de 10 a 14 horas mas reduzem expressivamente quando o fotoperíodo ultrapassa 16 horas.

4.2. Sensoriamento remoto aplicado à agricultura

Historicamente, reconhece-se que o termo Sensoriamento Remoto foi criado para designar o desenvolvimento dessa nova tecnologia de instrumentos capazes de obter imagens da superfície terrestre a distância remota. Por isso, a definição mais conhecida ou clássica de sensoriamento remoto é: uma técnica de obtenção de imagens dos objetos da superfície terrestre sem que haja contato físico de qualquer espécie entre o sensor e o objeto. Mas partindo de um preceito científico, o sensoriamento remoto pode ser definido como a técnica e a ciência que visam ao desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres (Meneses et al., 2012).

A energia solar que chega à superfície do planeta interage com todos os objetos ou alvos, inclusive com a camada superficial da Terra, chamada solo. Dessa interação a energia pode ser fracionada em até três partes: absorvida, refletida e transmitida dependendo, assim, das características físico-químicas e biológicas de cada objeto. Um dossel de vegetação pode ser considerado completo ou incompleto. É completo quando a porcentagem de cobertura vegetal do solo pela planta é próxima de 100% e incompleto quando apresenta baixa porcentagem de cobertura do solo, é um caso comum no início do desenvolvimento vegetativo de uma cultura agrícola, ou seja, parte da energia refletida da área é composta de uma parte proveniente das plantas e outra do solo em que foi implantada (Moreira, 2011).

O dossel de vegetação, a magnitude de cada uma dessas frações depende da região do espectro eletromagnético, em que as quantidades de energia absorvida, transmitida e refletida pelas folhas das plantas podem diferir de uma espécie para outra ou até mesmo dentro da própria espécie; sendo assim consequência, dentre outros, os fatores ambientais que influenciam direta ou indiretamente nesta interação. Cerca de 50% do total da energia que chega até a planta são absorvidos pelos pigmentos contidos nas folhas contribuindo para as principais reações fotoquímicas presentes nas plantas superiores (Moreira, 2011).

Ponzoni et al. (2012) dizem que a distribuição espacial dos elementos da vegetação, bem como suas densidades e orientações definem a arquitetura do dossel. Esta distribuição depende de como foram arranjadas as sementes do plantio, do tipo de vegetação existente e do estágio de desenvolvimento das plantas. Esta arquitetura é caracterizada pela orientação angular das folhas que varia consideravelmente entre os tipos de vegetação.

De acordo com Ponzoni et al. (2012) quando apresentados quais parâmetros são influentes sobre a reflectância espectral de folhas verificou-se que se referem às suas composições químicas, morfológicas, fisiológicas e umidade interna e que cada um deles exerce influência predominante em pelo menos três regiões espectrais do espectro óptico (visível, infravermelho próximo e infravermelho médio). No caso dos dosses verificou-se que ainda existem outros fatores e/ou parâmetros de natureza geométrica (iluminação e visada), espectral (propriedades espectrais dos elementos da vegetação – principalmente das folhas – e do solo) e biofísica (índice de área foliar - IAF e distribuição angular de folhas - DAF).

4.2.1. Sensor MODIS

O sensor MODIS foi desenvolvido para atuar em três distintos ambientes do sistema terra: atmosfera, ecossistemas aquáticos e terrestres. Em dezembro de 1999 a bordo do satélite TERRA, foi lançado ao espaço o primeiro sensor MODIS (Espectrorradiômetro Imageador de Resolução Moderada) e em maio de 2002 na plataforma AQUA, foi lançado o segundo sensor; ambos foram implementados pelo projeto do Sistema de Observação da Terra (EOS) da National Aeronautical and Space Administration (NASA) com o intuito de subsidiar os estudos e monitoramentos dos diferentes sistemas citados acima em função das complexidades das variações globais.

Este sensor possui 36 bandas espectrais estendendo-se da faixa do visível ao infravermelho termal do espectro eletromagnético, conforme vistas, na Tabela 1, suas características. As sete bandas iniciais são voltadas sobretudo para o sensoriamento remoto da superfície terrestre, das bandas 8 até a 16, destinadas para a coleta de dados da superfície oceânica e compreendendo o intervalo das bandas 17 a 19 auxiliando para medições atmosféricas. A partir da banda 20 a 36, com exceção da banda 26 (1360 – 1390 nm) que cobre a parte termal do respectivo espectro (3660 a 14385 nm), apresentam funções aplicativas multidisciplinares (MODIS, 2013).

Tabela 1. Características gerais do satélite Terra e do sensor MODIS

Órbita do satélite Terra	Sol síncrona, quase-polar, descendente, circular, cruza o equador às 10h30 horário local
Altitude do satélite Terra	705 km
Largura de imagens MODIS	2230 km (across track) e 10 km (along track e em nadir)
Bandas espectrais	36 bandas entre 0,405 e 14,385 μm
Resolução Radiométrica	16 bits
Resolução Espacial a nadir	250m (bandas 1-2), 500m (bandas 3-7) e 1 km (bandas 8-36)
Período de revisita	1-2 dias
Taxa de transferência de dados	11 Mbps

Fonte: Adaptada de Justice et al., (2002)

Devido sua frequência de passagens quase que diárias, facilitando assim os meios de pesquisas em determinado sistema de interesse, seja terrestre ou oceânica em função de sua resolução temporal abrangendo assim uma significativa faixa de visada de aproximadamente 2.330 km.

Este sensor oferece os produtos como os índices de vegetação: *Índice de Vegetação por Diferença Normalizada* (NDVI), *Índice de Vegetação Melhorado* (EVI) do MOD13Q1, Índice de Área Foliar (IAF) e Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa (fAPAR) do MOD15A2, exclusivamente voltados para atividade agrícola. Esses produtos são georreferenciados e corrigidos dos efeitos atmosféricos o que os torna juntamente com sua periodicidade, muito interessantes para aplicações na agricultura.

4.2.2. Índices de vegetação

Os princípios da divisão de bandas que foram apresentados é a criação de índices sendo o índice mais conhecido, divisão de bandas visando ao realce das variações de densidade da cobertura vegetal, ao qual se denomina Índice de Vegetação (IV). E através do comportamento espectral da cultura agrícola em estudo e com este subsídio pode reunir todas as possibilidades que venham a contribuir com uma estimativa de produtividade precisa.

Segundo Huete et al. (1988) a importância desses índices (IV) está em sua estreita correlação com vários parâmetros biofísicos da vegetação, ou seja, na possibilidade de se estimar parâmetros como índices de área foliar (IAF), biomassa vegetal, produtividade e atividade fotossintética.

4.2.2.1. Produto MOD13

O produto MOD13 contém os índices de vegetação NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) e EVI (Índice de Vegetação Melhorado). Eles são produzidos globalmente com a resolução de 1km, 500 m e 250 m, em composições de imagens ou mosaicos de 16 dias. Em geral, o NDVI é mais sensível à presença de clorofila e outros pigmentos da vegetação responsáveis pela absorção da radiação solar na banda do vermelho, enquanto que o EVI é mais sensível à variação na estrutura do dossel incluindo o LAI (Índice de Área Foliar), a fisionomia da planta e a arquitetura do dossel (Huete et al., 2002).

O índice de vegetação melhorado (EVI) foi desenvolvido para otimizar o sinal de resposta da vegetação melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa, além de propiciar o monitoramento da vegetação através de uma ligação do sinal de fundo do dossel e a redução das influências atmosféricas (Latorre et al., 2003).

Os índices de vegetação do produto MOD13 permitem realizar estudos tanto ao longo do tempo quanto no espaço, sobre as condições da cobertura vegetal em escalas global e regional.

4.2.2.2. Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI

Segundo Moreira (2000) o NDVI é o índice mais utilizado nos diversos estudos sobre a vegetação que envolvem o uso dos dados de sensoriamento remoto.

O NDVI é determinado pela diferença e a soma entre essas duas bandas do infravermelho próximo (IVP) e do vermelho (V) e visa eliminar diferenças sazonais do ângulo de elevação solar e minimizar os efeitos da atenuação atmosférica em imagens multitemporais. Os valores de NDVI computados variam de -1 a +1. A vantagem do NDVI sobre o RVI é que ele tende a ser linearmente mais proporcional à biomassa; também é mais apropriado quando se pretende fazer comparações ao longo do tempo de uma mesma área, pois se supõe ser menos influenciado pelas variações das condições atmosféricas. É um índice preferido ao RVI e amplamente utilizado numa escala continental ou global, de forma comercial. Inúmeros trabalhos fizeram relação do NDVI com diversos aspectos da vegetação, tais como: medida de índice de área foliar, determinação da porcentagem de cobertura do solo e estimativas da

radiação fotossinteticamente ativa usados em vários modelos para estudos de fotossíntese e sequestro de carbono (Meneses et al., 2012).

Esteves et al. (2012), observaram, avaliando as variações existentes do albedo, NDVI e o SAVI (Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo) durante o ciclo da cana-de-açúcar (cana-soca) através de imagens orbitais do sensor MODIS, para o NDVI que aos 85 DAC (Dias Após o Corte) seu valor estava estimado em 0,524 e com o passar dos dias este valor foi aumentando em função do desenvolvimento vegetativo da parte aérea, ou seja, à medida que a umidade do solo estava favorável a biomassa verde acompanhava e consequentemente o NDVI apresentava resposta significativa. No período de estiagem aumentou o déficit hídrico e o acúmulo de palhadas na cultura foi muito significativo reduzindo o NDVI de 0,726 para 0,511; aos 235 DAC, após o período chuvoso, o NDVI apresentou um índice de 0,738, quando o ciclo da cultura estava no período de maturação e o máximo desenvolvimento vegetativo alcançado, o valor do índice de vegetação da diferença normalizada obteve uma redução. Assim, se observou que o NDVI tem variação significativa em função da umidade do solo e acúmulo da biomassa verde.

Lucas & Schuler (2007), constataram, estudando o comportamento do NDVI com imagens do sensor AVHRR/NOAA durante o crescimento fenológico da cana-de-açúcar nos seus determinados estádios de desenvolvimento em um único ciclo, na mata norte de Pernambuco em dossel de cana de um ano, que é possível acompanhar variações fenológicas da cultura da cana-de-açúcar com imagens desse sensor em virtude da alta resolução temporal e mesmo com baixa resolução espacial e também verificaram que nos dois primeiros meses de ciclo não foram detectadas diferenças significativas fenológicas a partir do NDVI.

4.3. Geoprocessamento e Sistemas de Informações Geográficas

Segundo Câmara e Davis (2001) geoprocessamento é a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica. As aplicações de geoprocessamento em SIGs (Sistemas de Informações Geográficas) envolvem dois grupos de dados espaciais: geo-campos e geo-objetos (Goodchild, 1992). Os geo-campos são variações espaciais contínuas usadas para representar dados distribuídos espacialmente (Câmara, 1995), tais como mapas de solo e dados meteorológicos especializados. Os geo-campos não possuem identificação nem podem ser individualizados. Por conseguinte, sua

representação gráfica, resultante de uma classificação com base em alguns atributos, é tratada apenas como pertencente certa classe que a descreve. Os geo-campos correspondem, na prática, a dados temáticos, imagens de sensoriamento remoto, modelos numéricos de terreno etc. Os geo-objetos são dados individualizáveis que descrevem objetos do mundo real em termos do seu posicionamento em relação a um sistema de coordenadas, de seus atributos e das relações topológicas existentes (Câmara, 1995). Topologia é a estrutura de relacionamentos espaciais (vizinhança, proximidade, pertinência) que se podem estabelecer entre os objetos geográficos (Câmara e Medeiros, 1998). Os objetos geográficos podem estar associados a várias representações gráficas (polígonos, pontos etc.) e seus atributos são armazenados em um banco de dados convencional que permite ao sistema analisá-los e exibi-los segundo os interesses do usuário. Alguns exemplos de geo-objetos são: municípios, propriedades rurais e talhões agrícolas.

As ferramentas computacionais utilizadas em geoprocessamento, chamadas Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), são *softwares* especializados para aquisição, edição, armazenamento, integração, análise e saída de dados espacialmente distribuídos (Bailey e Gatrell, 1995). Além de promoverem a integração entre os geo-objetos e os geo-campos, os SIGs possuem a capacidade de analisar, de forma espacial, uma grande variedade de dados em amplas regiões geográficas para a extração de novas informações pertinentes à tomada de decisões permitindo que a ação de cada fator isolado e, em conjunto, seja avaliada rapidamente (Câmara e Medeiros, 1998).

Os sistemas de informações geográficos (SIG) viabilizam e facilitam a tomada de decisões no monitoramento de culturas agrícolas mas problemas normalmente encontrados, como dados incompletos ou redundantes com valores fora do domínio aceitável sem validação, dificultam a integridade desse banco de dados em um SIG. Portanto, a integridade e compatibilidades aos dados através de uma linguagem de consulta padrão SQL-92 (Structured Query Language) propiciam um simples entendimento pelo usuário e ótimo desempenho de consulta aos dados de acordo com Remma et al. (2010).

4.4. Modelos matemáticos

Os modelos matemáticos possibilitam o estudo de sistemas reais complexos os quais exigem modelos com integração coerente, banco de dados contendo informações experimentais

e edafo-climáticas, além da previsão do potencial genético de cada variedade, isto é, permitem prever as produtividades de variedades de cana-de-açúcar previamente calibradas em ensaios de campo em alocações em vários ambientes.

Bassanezi e Ferreira Junior (1988) definem Modelo Matemático como um sistema de equações obtido da análise e abstração de situações problemas com a devida escolha das variáveis e suas relações.

4.4.1. Modelos de estimativa da produtividade agrícola

A produção de cana-de-açúcar é bastante dependente de fatores fisiológicos, tratos culturais e ambientais. Dos fatores ambientais o clima exerce importante papel, de vez que as condições meteorológicas como temperaturas mínimas e máximas do ar durante os estádios fenológicos críticos, interferem na produtividade da cultura. Do mesmo modo, uma limitação hídrica na fase de perfilhamento e desenvolvimento dos colmos, é capaz de influenciar no desenvolvimento vegetativo e, conseqüentemente, na produtividade final.

Uma forma indireta de monitorar os efeitos de altas temperaturas e déficit hídrico em culturas agrícolas é através do uso do índice de vegetação obtido a partir de dados coletados por sensores remotos. Esses índices, além de reduzir a dimensão das informações espectrais e minimizar o impacto das condições de iluminação e visada, permitem modelar mais facilmente os dados espectrais em conjunto com as variáveis biofísicas da vegetação (Rizzi et al., 2006), tais como o Índice de Área Foliar (IAF).

Nassif et al. (2012), observaram, pesquisando sobre a parametrização e a avaliação do modelo DSSAT/Canegro em cinco variedades brasileiras de cana-de-açúcar, que os dados biométricos avaliados (produtividade, teor de sacarose, altura de colmo e área foliar) apresentaram melhor desempenho quando foram parametrizados com a técnica Glue. Para algumas variáveis estudadas o modelo superestimou e subestimou os resultados estimados. Para as variedades CTC e RB 86-7515 o modelo usado apresentou habilidades devido aos resultados estatísticos satisfatórios em predizer essas variáveis. Quando no modelo não houve correlações com os dados observados e os estimados, esta ocorrência foi devida ao fato do mesmo ser desenvolvido para alguns parâmetros americanos e não para as condições brasileiras.

4.4.2. Modelo agrônômico

Picoli et al. (2009), observaram, com o intuito de estimar a produtividade em talhões de cana-de-açúcar em dois anos – safras (2004/05 e 2005/06) implementando um modelo agrônômico ajustado e com o uso de imagens do sensor MODIS para determinação do NDVI e do IAF, que o modelo explicou 31% da variabilidade da produtividade observada que ficou em torno de 91,9 t ha⁻¹ com um erro quadrático médio de 20,9 t ha⁻¹ na primeira safra.

Na safra seguinte o modelo explicou apenas 25% da produtividade observada, apresentando uma média de 79,2 t ha⁻¹ com erro quadrático médio de 19,2 t ha⁻¹. Sendo assim, houve subestimação e superestimação do modelo nas duas safras observadas, mesmo tendo bom ajuste entre os dados estimados com os observados. Os autores perceberam que variáveis meteorológicas não explicam qualquer variação da produtividade em talhões de cana-de-açúcar e constataram que o uso de modelo agrônômico para estimar a produtividade agrícola é resultado promissor, principalmente para a incorporação da variável espectral do índice de vegetação (NDVI) (Picoli et al., 2009).

4.4.3. Modelo agrometeorológico

Os modelos agrometeorológicos se fundamentam na relação estatística entre variáveis dependentes, que deverão ser estimadas (por exemplo, produtividade de grãos ou desenvolvimento fenológico) e variáveis meteorológicas (precipitação pluvial, temperatura do ar e radiação solar), de acordo com uma regressão linear múltipla. A regressão linear múltipla visa estabelecer a importância relativa e a magnitude do efeito das variáveis independentes sobre a variável dependente (Moreira, 2008).

Esses tipos de modelo consideram apenas a influência de fatores climáticos sobre a produtividade da cultura, funcionando como medidores de eficiência. Em determinadas condições de clima, cultivo e operação, referidos modelos possibilitam a previsão de produtividades físicas da água a serem utilizadas nas análises econômicas e são particularmente importantes em análises de produção agrícola quando a água é escassa (Frizzone et al., 2005).

As principais críticas aos modelos agrometeorológicos se referem às suas aplicações consideradas, muitas vezes, específicas para uma localidade, ou incompletas, no sentido de omitir efeitos de outros fatores e suas interações com a água (Frizzone et al., 2005).

4.4.4. Modelo agrometeorológico-espectral

Alguns métodos têm sido propostos para incorporar uma variável espectral na estimativa da produtividade. Esses métodos relacionam os índices de vegetação à produtividade das culturas através de equações de regressão, sendo denominados modelos espectrais. Esses modelos também podem ser associados a modelos agrometeorológicos sendo então denominados modelos agrometeorológicos-espectrais.

De acordo com Rizzi (2004) o subsídio de variáveis espectrais aos modelos agrometeorológicos influencia numa ferramenta mais eficiente e de fundamental importância com o ambiente agrícola de estudo devido às suas variabilidades espaciais e temporais; as componentes agrometeorológicas tendem a explicar o comportamento da cultura em crescimento e desenvolvimento em função das condições meteorológicas.

Segundo Melo et. al (2008) além das condições meteorológicas que tem seu papel primordial, as variáveis espectrais conseqüentemente dizem respeito ao manejo agrônomo na cultura agrícola, das cultivares, da situação espacial e de determinados elementos não inclusos no componente agrometeorológico que vem influenciar na produtividade final de determinada área agrícola.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Área de estudo

A sede no município de Juazeiro (09°24'50" S e 40°30'10" W) está situada no Norte do Estado da Bahia, localizado na região sub-média da bacia do rio São Francisco, apresentando clima semiárido, distante 502 km da capital do estado, Salvador. A altitude do município está em torno de 368 m e a área de 6.389,623 km² tem, como principal atividade econômica, o polo de fruticultura irrigada com o cultivo de uva, manga, goiaba e melão, entre outras, e da cana-de-açúcar.

A pesquisa foi conduzida nas áreas de cultivo da Agroindústria do Vale do São Francisco – AGROVALE S.A., situada no sertão baiano, no município de Juazeiro – BA, a uma altitude de 395 m e coordenadas geográficas de 9° 28' 07" S e 40° 22' 43" W conforme a Figura 03. Segundo a classificação climática de KÖPPEN, a região apresenta o clima do tipo BSW^h. A temperatura média anual da região é 24,2 °C, com máxima média de 34,0 °C e a média das mínimas em torno dos 20,3 °C. A precipitação média anual é 399 mm, variando entre 1055 e 98 mm.

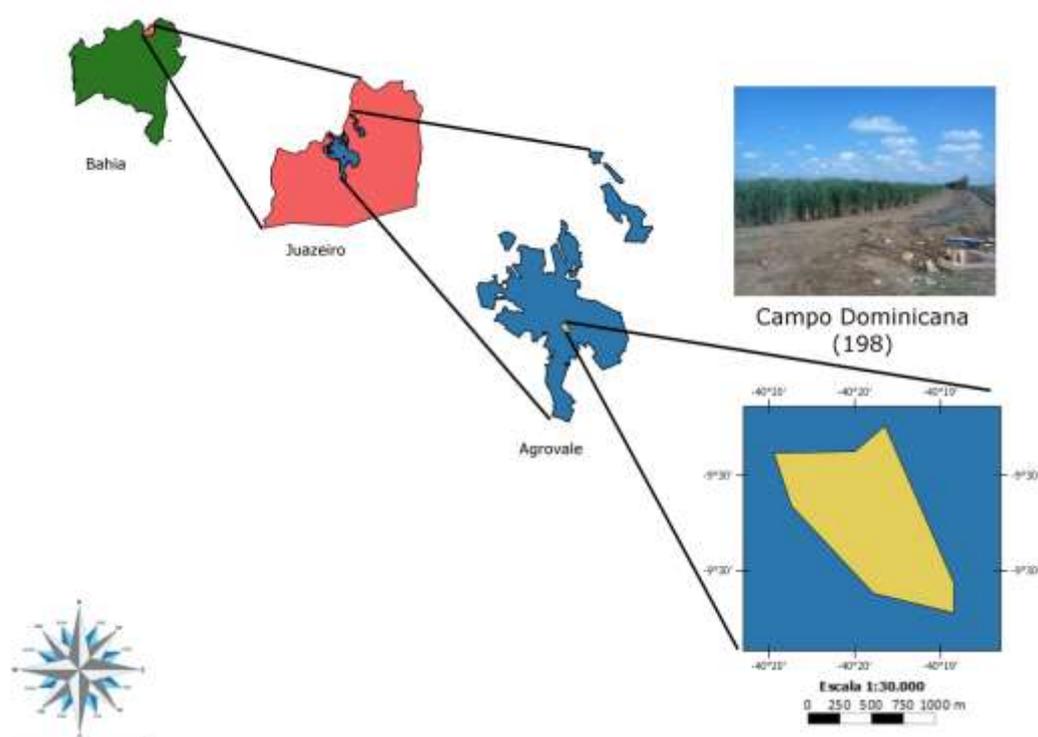


Figura 3: Localização das áreas de cultivo e estudo da AGROVALE no município de Juazeiro-BA.

Nesta área de estudo o Campo Dominicana (Código de identificação do campo é 198), é composto por 11 lotes com área total de 131,06 hectares, dos quais 121,50 hectares plantados com cana-de-açúcar, 9,34 hectares de ruas e drenos mais 0,22 hectare de pedras. O campo apresenta o mesmo: tipo de solo (vertissolo); o sistema de irrigação é por gotejamento, espaçamento (0,90m x 2,10m), variedade cultivada (SP 79-1011) e o tipo de colheita é manual. Nas safras a partir de 2014 após uma renovação do plantio desse campo, foram plantados em 93% dessa área, a variedade VAT 90-212 e os 7% restantes compostos de várias outras variedades.

5.2. Dados de produtividade anual

Os dados de produtividade para as safras agrícolas de 2005/2006 até 2011/2012 (período de calibração dos modelos) e dos anos-safra de 2004/2005, 2013/2014 e 2014/2015 (período de validação dos modelos) foram obtidos junto ao Departamento Agrícola da Usina expressos em toneladas por hectare ($t\ ha^{-1}$) estimado e real.

Na Tabela 2 segue o histórico de produtividade da área em estudo, desde a primeira colheita na safra de 1998/1999 até a última colheita, no ano-safra de 2011/2012, além do período de renovação de plantio com nova variedade ocorrida na safra 2012/2013 com a primeira colheita na safra de 2013/2014 e com a segunda colheita no ano-safra de 2014/2015.

No ano-safra de 2012/2013 ocorreu uma renovação da área, sendo feitos um novo preparo da área, plantio de uma nova variedade mais responsiva às condições locais, buscando sempre as melhores produtividades agrícolas. Esta renovação de plantio ocorreu em virtude do campo chegar em produtividades consideradas não satisfatórias (abaixo de $80\ t\ ha^{-1}$ o planejamento dos técnicos da usina é renovar a área, refazendo todas etapas para novo plantio) do ponto de vista financeiro ao planejamento agrícola feito no início do ano-safra.

Tabela 2: Dados de produtividade da cana-de-açúcar no campo Dominicana para os anos-safra de 1998/1999 a 2014/2015.

Ano-safra	Variedade	Colheita	Época de colheita	Produtividade (t ha ⁻¹)
1998/1999	SP 79-1011	1 ^a	-	146,00
1999/2000	SP 79-1011	2 ^a	-	105,00
2000/2001	SP 79-1011	3 ^a	-	113,00
2001/2002	SP 79-1011	4 ^a	-	101,00
2002/2003	SP 79-1011	5 ^a	-	117,00
2003/2004	SP 79-1011	6 ^a	-	93,00
2004/2005 ^{PV}	SP 79-1011	7 ^a	Novembro/2005	98,00
2005/2006 ^{PC}	SP 79-1011	8 ^a	Outubro/2006	101,51
2006/2007 ^{PC}	SP 79-1011	9 ^a	Outubro/2007	113,20
2007/2008 ^{PC}	SP 79-1011	10 ^a	Outubro/2008	96,20
2008/2009 ^{PC}	SP 79-1011	11 ^a	Setembro/2009	82,73
2009/2010 ^{PC}	SP 79-1011	12 ^a	Setembro/2010	83,36
2010/2011 ^{PC}	SP 79-1011	13 ^a	Agosto/2011	84,48
2011/2012 ^{PC}	SP 79-1011	14 ^a	Julho/2012	74,28
2012/2013	-	-	Renovação de plantio	-
2013/2014 ^{PV}	VAT 90-212	1 ^a	Junho/2014	261,86
2014/2015 ^{PV}	VAT 90-212	2 ^a	Julho/2015	171,77

PC = Período de calibração dos modelos e; PV = Período de validação dos modelos.

Fonte: Departamento Agrícola da Agroindústria do Vale do São Francisco – AGROVALE S.A

5.3. Dados meteorológicos

As variáveis meteorológicas requeridas foram: temperatura média do ar (°C); umidade relativa média do ar (%); insolação (horas dia⁻¹); radiação solar (W m⁻²), precipitação pluvial (mm dia⁻¹) e evapotranspiração (mm dia⁻¹); além desses dados foram utilizados dados da lâmina de irrigação (este último obtido no Departamento Agrícola da Usina Agrovale).

As variáveis meteorológicas foram obtidas junto ao Centro de Pesquisas Agropecuárias do Trópico Semiárido as quais foram coletadas diariamente na estação agrometeorológica

automática (Figura 04) da Fazenda Brasil Uvas (09°19'S e 40°11'W) localizada no Município de Juazeiro-BA, os quais foram transformados para uma média mensal. Desses dados foram utilizados o acumulado ou a média dos valores compreendidos, de acordo com a variável meteorológica, no intervalo dos três meses antecedentes à colheita, servindo de efeito de estudo aquele mês mais representativo e comum aos tipos de modelos em questão, tanto para o período de calibração quanto para a época de validação.



Figura 04: Estação Agrometeorológica Automática instalada na Fazenda Brasil Uvas, em Juazeiro – BA. **Fonte:** Embrapa Semiárido, 2015

Essa estação está instalada dentro de uma área cercada e gramada com dimensões de 10m x 10m, funcionando em rede e está equipada com equipamentos eletrônicos (sensor de temperatura e umidade relativa do ar; sensor de molhamento foliar; anemômetro; pluviômetro; radiômetro; saldo radiômetro; fluxímetro e sensor de temperatura do solo); os dados foram monitorados a cada 60 segundos e armazenadas médias de cada um a cada 30 minutos, durante todos os dias do ano.

5.4. Balanço hídrico climatológico sequencial mensal

Com o auxílio do software SEVAP (Sistema de Estimativa da Evapotranspiração) proposto por Silva et al. 2005, foi feito o balanço hídrico climatológico sequencial pela metodologia de Thornthwaite para cada ano-safra em que os dados de entrada para alimentação

do software foram temperatura (°C) e precipitação (mm) e os gráficos gerados no Microsoft excel.

5.5. Dados espectrais

As informações espectrais foram extraídas de imagens orbitais obtidas pelo sensor MODIS, a bordo da plataforma Terra; essas imagens do sensor MODIS (calculadas da série temporal de 16 dias) foram obtidas junto à Agência Espacial Norte Americana através do site www.reverb.echo.nasa.gov. O produto MOD13 contém também quatro bandas de fator de refletância de superfície, correspondentes, respectivamente, às regiões do azul (0,459-0,479 μm), do vermelho (0,62-0,67 μm), do infravermelho próximo (0,841-0,876 μm) e do infravermelho médio (2,105-2,155 μm).

Essas imagens do sensor MODIS (MOD13Q1) foram adquiridas ao longo do ano-safra correspondente, sendo assim feita uma trajetória do NDVI ao longo do ciclo da cultura observando o comportamento espectral nos três meses antecedentes ao início da colheita e foram escolhidas as imagens e o mês mais representativo em função dos melhores ajustes do modelo visto que a cultura da cana-de-açúcar estará próximo ao seu máximo desenvolvimento vegetativo.

5.5.1. Ferramenta de projeção geográfica Modis - MRT

Os produtos do MODIS a bordo da plataforma Terra são gerados pelo sistema MODIS Adaptive Processamento (MODAPS) localizado na NASA (National Aeronautics and Space Administration) como em grade de saída na projeção sinusoidal (SIN). Esses produtos de dados são então enviados para o LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center) para arquivo e distribuição. O Modis Reprojection Tool (MRT) permite aos usuários ler arquivos de dados em formato HDF-EOS (MODIS Nível-2G, Nível 3 e Nível 4-produtos de dados da terra), especificado em um subconjunto geográfico ou conjuntos de dados específicos da ciência como entrada para o processamento, executar a transformação geográfica para coordenadas de diferentes projeções sistema/cartográfica e escrever a saída de diferentes arquivos em formato HDF – EOS (Hierarchical Data Format – Earth Observing System) .

A Ferramenta de projeção geográfica do MODIS é um software desenvolvido para dar suporte à exploração dos produtos MODIS estando disponível para ser utilizado por todos os usuários registrados e sistemas operacionais distintos.

5.5.2. Índice de vegetação da diferença normalizada – NDVI

O NDVI foi obtido através da multiplicação entre o produto MOD13 que se encontra em níveis de cinza ($NDVI_{NC}$) pelo fator de conversão, de acordo com a equação 01:

$$NDVI = NDVI_{NC} \cdot 0,0001 \quad (01)$$

Em que o NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada; e o $NDVI_{NC}$ é o índice de vegetação em níveis de cinza.

5.5.3. Fração de cobertura do solo – FC

A partir dos valores encontrados do NDVI, foram transformadas em imagens de fração de cobertura do solo através do método proposto por Choudhury et al. (1994) conforme a equação 02:

$$FC = 1 - \left(\frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^{0,6} \quad (02)$$

Em que o FC é a fração de cobertura do solo; $NDVI_{max}$ é o valor máximo do NDVI da imagem; NDVI é o índice de vegetação da diferença normalizada; $NDVI_{min}$ é o valor mínimo do NDVI da imagem.

5.5.4. Índice de área foliar – IAF

Uma vez determinados os valores da fração de cobertura do solo, segundo Norman et al. (2003), o valor do índice de área foliar também foi determinado de acordo com a equação 03:

$$IAF = -2 \ln (1 - FC) \quad (03)$$

Em que o IAF é o índice de área foliar e FC é a fração de cobertura do solo. Para obtenção dos resultados espectrais (NDVI, IAF e FC) citados acima, foram usadas duas imagens de cada mês correspondente à época da calibração e validação para extração do valor da média mensal.

5.6. Calibração dos modelos estatísticos de estimativas

A calibração foi feita mediante o teste de todas as variáveis independentes correlacionadas com a produtividade agrícola (variável dependente), cuja escolha das variáveis independentes ficou condicionada à significância do modelo (coeficientes de determinação e correlação), à probabilidade \leq a 5% e ao erro padrão de estimativa baixo.

Para o período de calibração dos modelos foram analisados os três meses antecedentes à colheita naquele ano-safra correspondente escolhendo-se aquela época mais significativa e comum aos três tipos de modelo em questão.

No caso do presente estudo o segundo mês antecedente à colheita foi escolhido porque apresentou os resultados satisfatórios citados anteriormente, além de serem comuns aos modelos testados.

5.6.1. Modelo agrometeorológico

Os valores de produtividade foram estimados por um modelo de regressão linear múltipla baseado somente em dados agrometeorológicos, conforme a equação 04.

$$Y_i' = \alpha + X_1 \cdot \beta_1 + X_2 \cdot \beta_2 + X_3 \cdot \beta_3 + X_4 \cdot \beta_4 + \varepsilon \quad (04)$$

Em que o Y_i' é o índice de produtividade agrícola estimada (dependente), X_1 , X_2 , X_3 e X_4 são as variáveis independentes (irrigação mais precipitação – IP; temperatura média do ar – T; Déficit de saturação de vapor do ar – DEF e fotoperíodo – N), α , β_1 , β_2 , β_3 e β_4 são os parâmetros a serem estimados e ε são os resíduos.

5.6.2. Modelo espectral

Os valores de produtividade foram estimados por um modelo de regressão linear múltipla baseado apenas em dados espectrais, conforme a equação 05:

$$Y_i' = \alpha + X_1 \cdot \beta_1 + X_2 \cdot \beta_2 + \varepsilon \quad (05)$$

Em que o Y_i' é o índice de produtividade agrícola estimada (dependente), X_1 e X_2 são as variáveis independentes (índice de área foliar – IAF e fração de cobertura do solo – FC), α , β_1 e β_2 são os parâmetros a serem estimados e ε são os resíduos.

5.6.3. Modelo agrometeorológico-espectral

A escolha dos indicadores foi baseado nos resultados da análise de correlação, entre elementos agrometeorológicos e espectral (NDVI), com a produtividade de cana-de-açúcar das áreas em estudo. Entretanto, somente foram empregados aqueles componentes agrometeorológicos que, certamente, influenciaram o desenvolvimento das plantas e o resultado da produtividade final, de acordo com o que foi abordado na revisão bibliográfica (Junges e Fontana, 2011).

A partir da definição dos indicadores agrometeorológicos e espectrais foi ajustada uma regressão linear múltipla para estimativa da produtividade, conforme a equação 06:

$$Y_i' = \alpha + X_1 \cdot \beta_1 + X_2 \cdot \beta_2 + X_3 \cdot \beta_3 + X_4 \cdot \beta_4 + \varepsilon \quad (06)$$

Em que o Y_i' é o índice de produtividade agrícola estimada (dependente), X_1 , X_2 , X_3 e X_4 são as variáveis independentes (irrigação mais precipitação – IP; temperatura média do ar – T; Déficit de saturação de vapor do ar – DEF e índice de vegetação por diferença normalizada – NDVI), α , β_1 , β_2 , β_3 e β_4 são os parâmetros a serem estimados e ε são os resíduos.

5.7. Estimativa pelos técnicos da usina

A estimativa feita pela usina é realizada mediante o conhecimento empírico dos técnicos, desde o plantio até meados do período de colheita propriamente dito. Esta época

coincide com o período que antecede a colheita e que através de uma análise visual ao redor dos carregadores das quadras de cana-de-açúcar eles calculam a produção utilizando, como indicadores: a produtividade do ano anterior; o histórico da área e outros fatores (agronômicos e climáticos) inerentes ao desenvolvimento da cultura.

Outro fator importante é a dimensão do dossel da cultura no momento em que a inspeção do comportamento das plantas, principalmente pelas bordas das quadras, foi realizada, o que induziu a erros significativos. Os índices de acerto foram maiores quando esses levantamentos foram feitos próximos dos períodos de colheita.

5.8. Análises estatísticas

Tanto nos dados meteorológicos quanto nos espectrais, foi feita uma análise de correlação no software Statistica versão 10 para ver a influência significativa dessas variáveis na produtividade final da cultura da cana-de-açúcar.

Os dados foram avaliados através do cálculo da Diferença Média Absoluta (DMA), a Diferença Média Relativa (DMR %) e a Raiz da Diferença Quadrática Média (RDQM), entre a produtividade estimada pelos modelos e a produtividade considerada real calculada com valores coletados em campo; são descritas, a seguir, as equações para o cálculo das diferenças:

$$DMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i' - Y_i| \quad (07)$$

$$DMR = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i' - Y_i|}{|Y_i|} \quad (08)$$

$$RDQM = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i' - Y_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (09)$$

Em que o Y_i corresponde ao valor da produtividade observada ou real (dados que serão coletados em campo); o Y_i' corresponde ao valor de produtividade estimada pelo modelo e o n corresponde ao número de anos-safra de dados da produtividade.

Para verificar o desempenho dos modelos foi realizado o cálculo do coeficiente de Pearson, r ($p < 0,05$) que mede o grau da correlação e a direção dessa correlação, se positiva ou negativa entre duas variáveis de escala métrica. Este coeficiente assume valores entre -1 e 1;

quando 1 significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis e quando -1, significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis isto é, se uma aumenta a outra sempre diminui e quando 0 significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra.

$$r = \frac{C_{XY}}{S_X S_Y} \quad (10)$$

Em que o C_{XY} é a covariância ou variância conjunta das variáveis X e Y; o S_X é o desvio padrão da variável X e o S_Y é o desvio padrão da variável Y.

A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados e foi dada estatisticamente pelo índice de concordância “d” proposto por Willmott et al. (1985). Seus valores variam de zero para nenhuma concordância, a 1, para a concordância perfeita. O índice é dado pela Equação 11:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (Y'_i - Y_i)^2}{\sum (|Y'_i - Y| + |Y_i - Y|)^2} \right] \quad (11)$$

Em que o Y'_i é o valor estimado; o Y_i é o valor observado e o Y é a média dos valores observados.

Segundo Camargo e Sentelhas (1997), os seguintes indicadores estatísticos foram considerados para correlacionar os valores estimados com os medidos: exatidão - índice de Willmott “d” e de confiança ou desempenho “c”. O índice “c” é calculado conforme a equação 12:

$$c = r \times d \quad (12)$$

Mediante o valor encontrado na equação 12, eles são classificados numa escala conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Classificação do desempenho dos métodos de estimativas da produtividade agrícola pelo índice c

Valores de c	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997)

Os resultados encontrados pelos modelos estatísticos de produtividades tanto para o período de calibração quanto para a época de validação serão descritos a seguir a partir dos resultados e discussão.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Balanço hídrico climatológico sequencial mensal

Nas Figuras 5a, 5b, 5c e 5d são apresentados os extratos dos cenários hídricos referentes aos anos-safra de 2005/2006, 2006/2007, 2007/2008 e 2008/2009, respectivamente. Nas Figuras 6a, 6b e 6c são apresentados os extratos dos cenários hídricos referentes aos anos-safra de 2009/2010, 2010/2011 e 2011/2012, respectivamente; foi possível observar que durante todo o ciclo da cultura houve deficiência hídrica levando em consideração a precipitação pluviométrica que foi abaixo da média para a região; mesmo assim, não trouxe eventuais quebras de produtividade visto que a monocultura foi cultivada em área com irrigação plena.

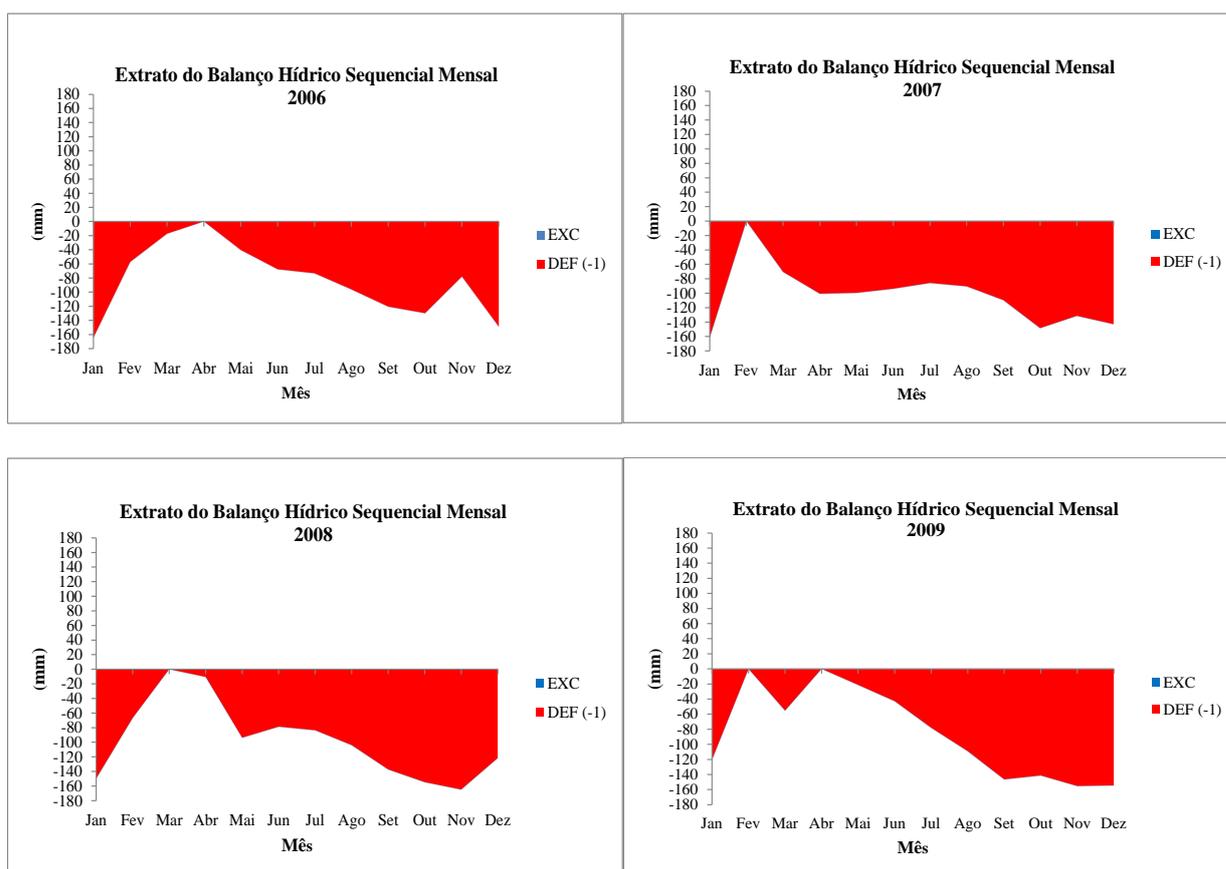


Figura 5: Extrato do cenário hídrico dos anos-safra de 2005/2006 a 2008/2009

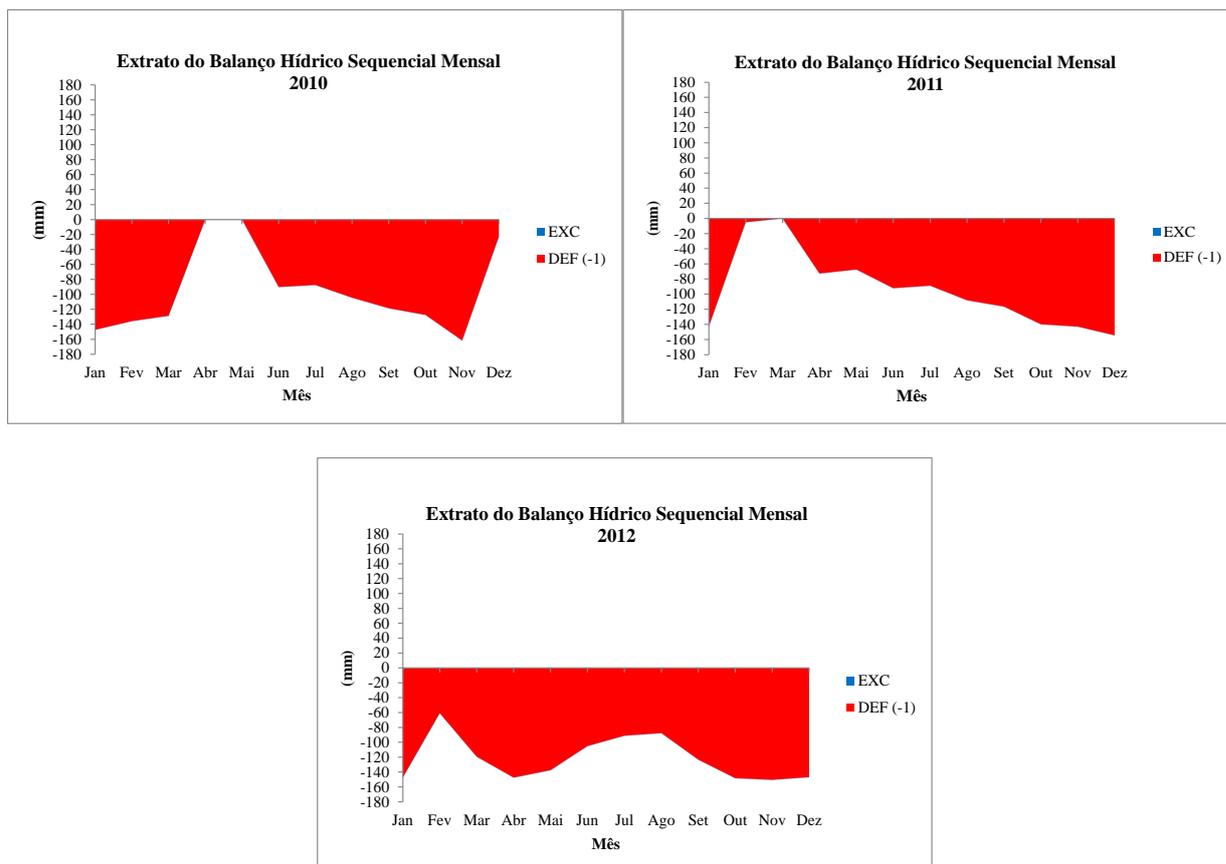


Figura 6: Extrato do cenário hídrico dos anos-safra de 2009/2010 a 2011/2012

A disponibilidade de água para a planta da cana-de-açúcar é extrema importância para seu desenvolvimento produtivo, sabendo-se que esse consumo de água é variável de acordo com o estágio fenológico como também as variações de clima local e variedade, apresentado um consumo médio $3,5 \text{ mm dia}^{-1}$, de acordo com o estudo feito por Scardua e Rosenfeld (1987).

Como se pode observar nas Figuras do Apêndice A1 e A2, para este período avaliado, é possível constatar que os anos-safra de 2005/2006 a 2011/2012 apresentaram similaridade em relação à deficiência hídrica acentuada a partir do mês de maio, em boa parte dos anos observados, coincidentemente logo após o período em que ocorrem os picos de precipitação significativa para a região porém a produtividade agrícola não foi influenciada negativamente devido à suplementação hídrica via irrigação que ocorreu em 100% da área plantada, assim como ilustra a Tabela 4.

Tabela 4. Produtividade agrícola ($t\ ha^{-1}$) em função do cenário hídrico para os anos-safra de 2005/2006 a 2011/2012

Ano-safra	Precipitação acumulada (mm)	Volume de água aplicado via irrigação (mm)	Produtividade de cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$)
2005/2006	523,75	63.050,9	101,51
2006/2007	299,43	90.886,9	113,20
2007/2008	377,18	86.738,5	96,20
2008/2009	522,89	79.836,1	82,73
2009/2010	213,09	94.556,4	83,36
2010/2011	408,19	91.931,2	84,48
2011/2012	162,05	74.480,4	74,28

Fonte: Departamento Agrícola da Agroindústria do Vale do São Francisco – AGROVALE S.A

Como pode ser observado na Tabela 4 citada anteriormente para o período de calibração dos modelos que foi de 2005/2006 a 2011/2012, levando em consideração o volume médio acumulado da precipitação registrada mais o volume de água fornecido via irrigação, cada ano-safra recebeu em média aproximadamente 83.426,71 mm de água; mesmo assim foi verificada uma queda de produtividade de até 73,18% quando analisados a primeira e a última produtividade para o primeiro e o último ano, respectivamente, do período de calibração dos modelos.

Holanda et al. (2014), observaram, tentando determinar saídas para contornar o efeito significativo do déficit hídrico na produtividade agrícola, o comportamento de algumas variedades de cana-de-açúcar em diferentes condições de deficiências hídricas para auxiliar na seleção de genótipos tolerantes à seca e perceberam que as variáveis morfológicas foram eficientes para diferenciar as cultivares em tolerantes e susceptíveis.

Vianna e Sentelhas (2014), verificaram, estudando o risco de déficit hídrico da cultura da cana-de-açúcar em diferentes regiões do Brasil, que o risco de déficit hídrico varia de acordo com a capacidade de retenção de água no solo e que a região de Petrolina-PE, apresenta maior risco devido à variabilidade climática com baixa precipitação ao longo do ano, elevadas temperaturas durante o dia e reduzida capacidade de retenção de água no solo.

6.2. Calibração dos modelos estatísticos de estimativas de produtividade

6.2.1. Modelo agrometeorológico

Na Tabela 5 é apresentado o modelo agrometeorológico (MA) de regressão linear múltipla para a estimativa de produtividade no segundo mês antecedente à colheita. O modelo apresentou-se significativo a nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$) com intervalo de confiança de 95% para o valor estimado apresentando bom coeficiente de determinação (R^2), em torno de 99%.

Tabela 5: Coeficientes do modelo agrometeorológico (MA) com as respectivas probabilidades de erro (p), correlações lineares (r), índice de concordância de Willmott (d) e Erro Padrão de estimativa

Variáveis independentes (MA)	β	p de erro
α	727,4707	0,036270
IP	0,19305	0,248413
T	-2,45019	0,013016
DEF	-0,00082	0,017164
N	2,13792	0,994553
$r = 0,99$ $R^2 = 0,99$ $p < 0,0274$ $d = 0,99$		
Erro Padrão de estimativa: 2,7264		

IP = Irrigação + Precipitação (mm); T = Temperatura média do ar (C°); DEF = Déficit de saturação de vapor do ar (hPa); N = Fotoperíodo (horas).

Na Tabela 5 citada acima se encontram o coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância (d) do modelo, segundo proposto por Camargo & Sentelhas (1997) o índice de desempenho ou confiança (c) do modelo de estimativa de produtividade ficou em torno de 0,9801, classificado como ótimo para o período analisado.

Mesmo apresentando boa significância de modo geral para o modelo e observando separadamente as variáveis que o compõem, visto que com a exceção da IP e do N, as variáveis T e DEF foram bastante significativas. A variável IP obteve a $p = 0,248413$ no segundo mês antecedente à colheita, como é um cenário de baixo regime pluviométrico com dependência significativa da irrigação, esta variabilidade hídrica coincide com o mês em que a irrigação foi cessada aos poucos para induzir a maturação da cana-de-açúcar e garantir o máximo de sacarose nos colmos.

Na Tabela 6 são comparados os resultados reais e estimados no período de 2005/2006 a 2011/2012 pelo modelo agrometeorológico (MA). Os erros de ajuste ou previsão, são medidos pelo desvio:

$$\text{Desvio} = (\text{Produtividade real}) - (\text{Produtividade estimada}).$$

Ainda na Tabela 6 pode-se observar que na maioria dos anos-safra estudados (71,43%) os erros de ajustes não alcançaram 01 desvio padrão; por outro lado, 28,57% dos anos, o desvio varia (em valor absoluto) de até quase duas vezes o desvio padrão.

Tabela 6: Resultados dos valores reais X valores estimados para o modelo agrometeorológico (MA) para os anos-safra de 2005/2006 a 2011/2012

Ano-Safra	Produtividade (t ha ⁻¹)		Residuais	Residuais Padronizados
	Real	Estimada (MA)		
2005/2006	101,51	99,53	1,98093	0,726564
2006/2007	113,20	112,94	0,25784	0,094571
2007/2008	96,20	97,87	-1,67440	-0,614134
2008/2009	82,73	81,07	1,66122	0,609301
2009/2010	83,36	83,77	-0,40561	-0,148769
2010/2011	84,48	86,71	-2,23144	-0,818446
2011/2012	74,28	73,87	0,41145	0,150912

Na Figura 7A é possível observar, no gráfico, os valores correspondentes às produtividades reais e a estimada, respectivamente. De acordo com a Figura do modelo agrometeorológico (MA), o coeficiente de determinação (R^2) foi considerado satisfatório cujas variáveis explicam 99% sem apresentar desvios significativos de ajustes, aproximando-se bem da produtividade real fornecida pela usina. No caso da Figura 7B que representa o desempenho da usina e apesar de apresentar proximidade dos valores reais com os estimados pelos técnicos justificando assim o coeficiente de 99% do índice de concordância de Willmott et al. (1985), é possível identificar alguns desvios importantes de ajuste; em consequência, isto pode ocorrer com respeito para à previsão de valores futuros.

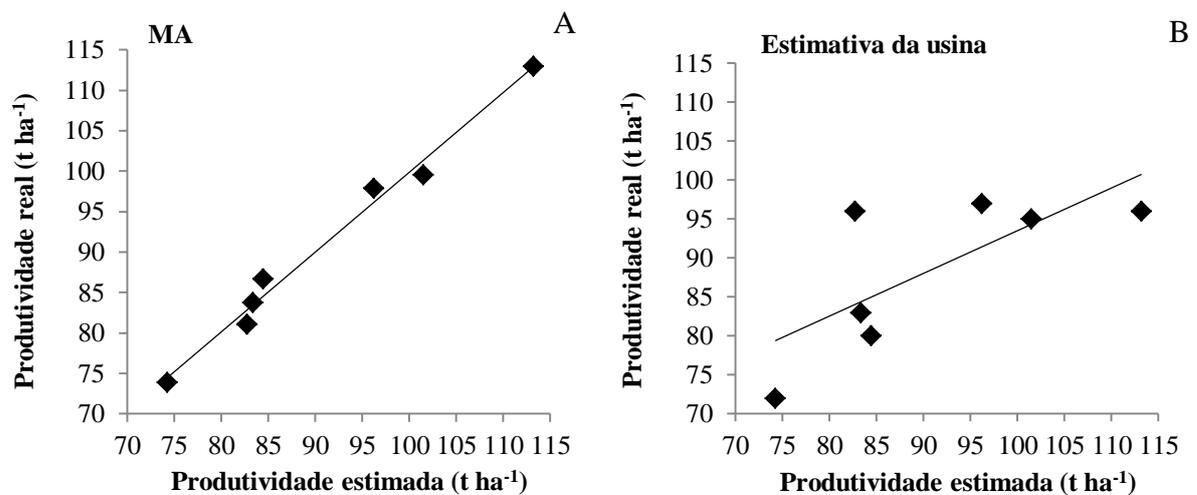


Figura 7: Modelo agrometeorológico (MA) e da estimativa da usina com os valores reais em relação aos valores estimados.

Araújo et al. (2011) e Souza et al. (2013) constataram que as interações intrínsecas (variedade, genética, etc) e extrínsecas (luz, água, solo, pragas etc) à planta e que são difíceis de mensurar via modelagem resultam em comportamentos distintos e essenciais para a obtenção do êxito na calibração de um modelo agrometeorológico na estimativa da produtividade agrícola de uma cultura qualquer, levando em consideração apenas os dados de produção e meteorológico.

De acordo com os anos-safra testados para calibração do modelo agrometeorológico (MA) para estimativa de produtividade se encontra na Tabela 7, as respectivas diferenças média absoluta (DAM), diferença média relativa (DMR) e raiz da diferença quadrática média (RDQM).

Tabela 7: Valores da produtividade real ($t\ ha^{-1}_{real}$) e da produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico (MA) e da usina, com suas respectivas diferenças média absoluta (DMA), diferença média relativa (DMR) e raiz da diferença quadrática média (RDQM), para os anos-safra estudados

Ano-Safra	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)		DMA	DMR (%)	RDQM
	Real	Estimada (MA)			
2005/2006	101,51	99,53	1,98	1,95	3,92
2006/2007	113,20	112,94	0,26	0,23	0,07
2007/2008	96,20	97,87	1,67	1,74	2,79
2008/2009	82,73	81,07	1,66	2,01	2,76
2009/2010	83,36	83,77	0,41	0,49	0,71
2010/2011	84,48	86,71	2,23	2,64	4,97
2011/2012	74,28	73,87	0,41	0,55	0,17

Ano-Safra	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)		DMA	DMR (%)	RDQM
	Real	Estimada (Usina)			
2005/2006	101,51	95,00	6,51	6,41	42,38
2006/2007	113,20	96,00	17,20	15,19	295,84
2007/2008	96,20	97,00	0,80	0,83	0,64
2008/2009	82,73	96,00	13,27	16,04	176,09
2009/2010	83,36	83,00	0,36	0,43	0,13
2010/2011	84,48	80,00	4,48	5,30	20,07
2011/2012	74,28	70,00	2,28	3,07	5,20

Entre os anos-safra testados pelo modelo agrometeorológico (MA) a safra de 2006/2007, em que o plantio se encontrava na 9º folha, ou seja, na 9º colheita, como pode ser observado na Tabela 7 acima, apresentou a menor diferença média relativa de 0,23% e a maior diferença média relativa de 2,64% foi registrada na safra anterior, de 2010/2011 porém com exceção do ano de 2008/2009 e 2010/2011, os demais anos apresentaram boas diferenças médias relativas. Analisando os valores reais em relação com os estimados pela própria usina, a menor diferença média relativa encontrada foi de 0,43% na safra de 2009/2010 e as maiores diferenças médias relativas foram de 15,19% e 16,04% nas safras de 2006/2007 e 2008/2009, respectivamente.

Ao observar as diferenças relativas média do modelo é perceptível que não ocorreu diferença abrupta entre os valores quando comparados com os valores encontrados na estimativa da usina.

Segundo Frizzone et al. (2005) as principais críticas aos modelos agrometeorológicos se referem às suas aplicações consideradas, muitas vezes, específicas para uma localidade ou

incompletas, no sentido de omitir efeitos de outros fatores e suas interações com a água, pois é considerada apenas a influência de fatores climáticos sobre a produtividade da cultura.

Na Figura 8 tem-se o comparativo da variação percentual entre as produtividades reais e a estimada pelo modelo agrometeorológico nas safras de 2005/2006 a 2011/2012. Percebe-se que houve variação percentual próximo de até 5% em algum caso isolado quando analisado o modelo, corroborando com o Erro Padrão de Estimativa de aproximadamente de 03 (três) toneladas de cana para mais ou para menos, descrito na Tabela 2, já citada.

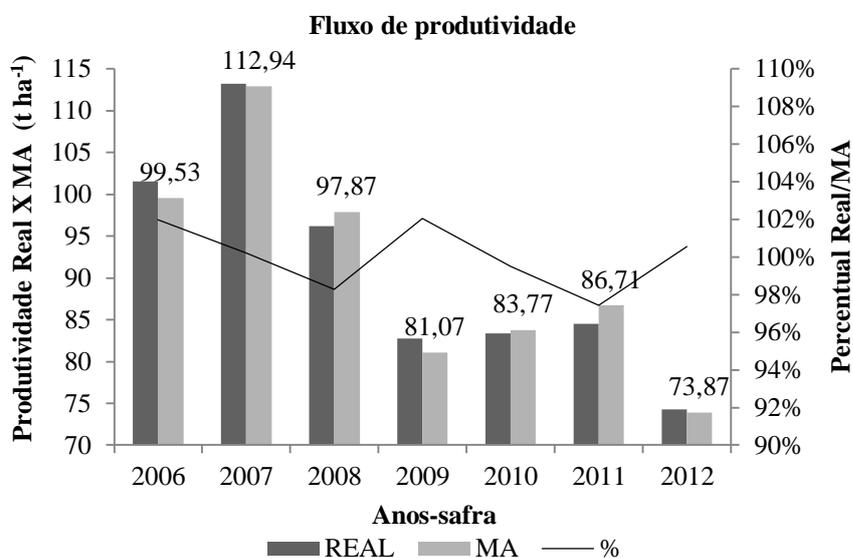


Figura 8: Variação percentual da produtividade real e a estimada pelo modelo agrometeorológico (MA).

Na Figura 9 se encontra o comparativo da variação percentual da produtividade real e a estimada pelos técnicos da usina para o mesmo período agrícola utilizado na calibração do modelo agrometeorológico (MA). Foi constatado que essa variação percentual entre as produtividades ficou próxima de até 22% em algum ano, influenciando diretamente em um erro subestimado de até 17 toneladas de cana.

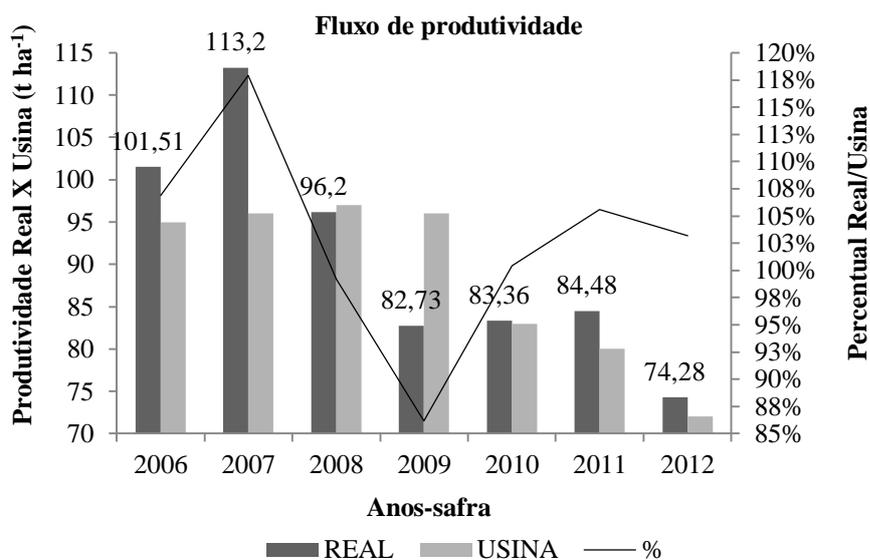


Figura 9: Variação percentual da produtividade real e a estimada pelos técnicos da usina.

6.2.2. Modelo espectral

Na Tabela 8 é apresentado o modelo espectral (ME) de regressão linear múltipla para a estimativa de produtividade no segundo mês antecedente à colheita. O modelo apresentou-se próximo do nível significativo de 5% de probabilidade ($p < 0,05$) com razoável coeficiente de determinação (R^2) de 72%.

Tabela 8: Coeficientes do modelo espectral (ME) com as respectivas probabilidades de erro (p), correlações lineares (r), índice de concordância de Willmott (d) e Erro Padrão de estimativa

Variáveis independentes (MAE)	β	p de erro
α	196,068	0,012893
IAF	4,904	0,186623
FC	-5,619	0,142213
$r = 0,85$ $R^2 = 0,72$ $p < 0,0800$ $d = 0,98$		
Erro Padrão de estimativa: 8,7354		

IAF = Índice de área foliar; FC = Fração de cobertura do solo.

Segundo a ilustração da Tabela 8 acima se encontram o coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância (d) do modelo, segundo proposto por Camargo e Sentelhas (1997) o índice de desempenho ou confiança (c) do modelo de estimativa de produtividade ficou em torno de 0,833, classificado como muito bom para os valores analisados.

Embora apresentando efeito significativo próximo da probabilidade esperada de 5% de modo geral para o modelo e observando separadamente as variáveis derivadas do NDVI que o compõem, IAF e FC não foram bastante significativas como descritas as probabilidades. Este desempenho do modelo espectral reflete diretamente no tamanho do pixel da imagem haja vista pode ter ocorrido alguma anormalidade no plantio devido ao manejo agrícola, como excesso de palha, ataques fitossanitários e até mesmo déficit hídrico pois coincide em período no qual a irrigação é cessada.

Na Tabela 9 são comparados os resultados reais e estimados no período de 2005/2006 a 2011/2012 pelo modelo espectral (ME). Os erros de ajustes ou previsão são medidos pelo desvio:

$$\text{Desvio} = (\text{Produtividade real}) - (\text{Produtividade estimada}).$$

Ainda se pode, na Tabela 9, observar que na maioria dos anos-safra estudados (57,14%) os erros de ajustes não alcançaram 01 desvio padrão; por outro lado, em 42,86% dos anos-safra o desvio varia (em valor absoluto) de até quase oito vezes o desvio padrão.

Tabela 9: Resultados dos valores reais X valores estimados para o modelo espectral (ME) para os anos-safra de 2005/2006 a 2011/2012

Ano-Safra	Produtividade (t ha ⁻¹)		Residuais	Residuais Padronizados
	Real	Estimada (ME)		
2005/2006	101,51	95,09	6,42001	0,73494
2006/2007	113,20	105,21	7,99364	0,91509
2007/2008	96,20	103,52	-7,32184	-0,83818
2008/2009	82,73	92,18	-9,45352	-1,08221
2009/2010	83,36	84,31	-0,94537	-0,10822
2010/2011	84,48	77,79	6,69195	0,76608
2011/2012	74,28	77,67	-3,38487	-0,38749

Na Figura 10A é possível observar no gráfico os valores correspondentes às produtividades reais e as estimadas, respectivamente. De acordo com a Figura do modelo espectral (ME), o coeficiente de determinação (R²) foi considerado satisfatório em que as variáveis explicam 72% apresentando desvios significativos de ajustes nas safras de 2007/2008, 2008/2009 e 2010/2011 mas se aproximando bem nos demais anos da produtividade real fornecida pela usina. No caso da Figura 10B que representa o desempenho da usina e apesar de apresentar uma proximidade dos valores reais com os estimados pelos técnicos justificando

assim o coeficiente de 99% do índice de concordância de Willmott et al. (1985), é possível identificar alguns desvios importantes de ajuste; em consequência, isto pode ocorrer com respeito à previsão de valores futuros.

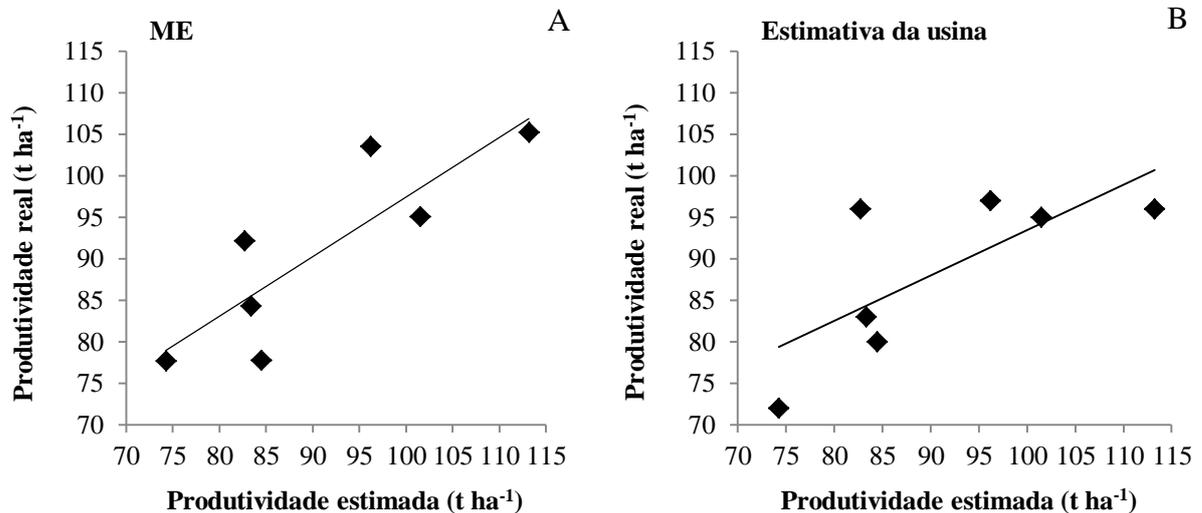


Figura 10: Modelo espectral (ME) e da estimativa da usina com os valores reais em relação aos valores estimados.

De acordo com Melo et al. (2008) as variáveis espectrais expressam, além das condições meteorológicas, a influência das práticas de manejo dos cultivares, da localização espacial e de demais elementos não incluídos no componentes agrometeorológicos, na produtividade final corroborando com os resultados encontrados pelo modelo espectral pois muitos desses desvios apresentados conforme na Figura 10, são decorrentes de indicadores agrônômicos e anormalidades dos fatores climáticos inerentes ao desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar; portanto e de acordo com os anos-safra testados para calibração do modelo espectral (ME) para estimativa de produtividade se encontram na Tabela 10, as respectivas diferenças média absoluta (DAM), diferença média relativa (DMR) e raiz da diferença quadrática média (RDQM).

Ao observar as diferenças médias relativas ao modelo foi perceptível a ocorrência de uma diferença abrupta entre alguns valores quando comparados com os valores encontrados na estimativa da usina.

Tabela 10: Valores da produtividade real ($t\ ha^{-1}_{real}$) e da produtividade estimada pelo modelo espectral (ME) e da usina, com suas respectivas diferença média absoluta (DMA), diferença média relativa (DMR) e raiz da diferença quadrática média (RDQM), para os anos-safra estudados

Ano-Safra	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)		DMA	DMR (%)	RDQM
	Real	Estimada (ME)			
2005/2006	101,51	95,09	6,42	6,32	41,22
2006/2007	113,20	105,21	7,99	7,06	63,84
2007/2008	96,20	103,52	7,32	7,61	53,58
2008/2009	82,73	92,18	9,45	11,42	89,30
2009/2010	83,36	84,31	0,95	1,14	0,90
2010/2011	84,48	77,79	6,69	7,92	44,76
2011/2012	74,28	77,67	3,39	4,56	11,49

Ano-Safra	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)		DMA	DMR (%)	RDQM
	Real	Estimada (Usina)			
2005/2006	101,51	95,00	6,51	6,41	42,38
2006/2007	113,20	96,00	17,20	15,19	295,84
2007/2008	96,20	97,00	0,80	0,83	0,64
2008/2009	82,73	96,00	13,27	16,04	176,09
2009/2010	83,36	83,00	0,36	0,43	0,13
2010/2011	84,48	80,00	4,48	5,30	20,07
2011/2012	74,28	70,00	2,28	3,07	5,20

Observando os anos-safra analisados em função dos resultados obtidos pelo modelo espectral (ME), a safra de 2009/2010, quando o plantio se encontrava na 12^o folha, ou seja, na 12^o colheita, como pode ser observado na Tabela 9 acima, apresentou a menor diferença média relativa de 1,14% e a maior diferença média relativa de 11,42% foi registrada na safra anterior, de 2008/2009. Quando comparados com os outros modelos, as diferenças médias relativas foram consideradas elevadas. Percebe-se, com base nos resultados encontrados com o modelo espectral em função dos obtidos pela usina, que houve uma diferença mínima média entre as diferenças médias relativas de 0,43% e 0,83%, respectivamente.

A Figura 11 apresenta o comparativo da variação percentual entre as produtividades reais e as estimadas pelo modelo espectral nas safras de 2005/2006 a 2011/2012. Percebe-se que houve variação percentual de até 17% quando analisado o modelo assimilando-se bem com o Erro Padrão de Estimativa de aproximadamente de 09 (nove) toneladas de cana para mais ou para menos, descritos na Tabela 7 citada anteriormente mas que para modelos espectrais e segundo Liu (2007), erros de estimativa de até 20% são considerados satisfatórios.

Na Figura 12 se encontram o comparativo da variação percentual da produtividade real e a estimada pelos técnicos da usina para o mesmo período agrícola utilizado na calibração do modelo espectral (ME). Foi patente que essa variação percentual entre as produtividades ficou próxima de até 22% em algum ano, influenciando diretamente em um erro subestimado de até 17 toneladas de cana.

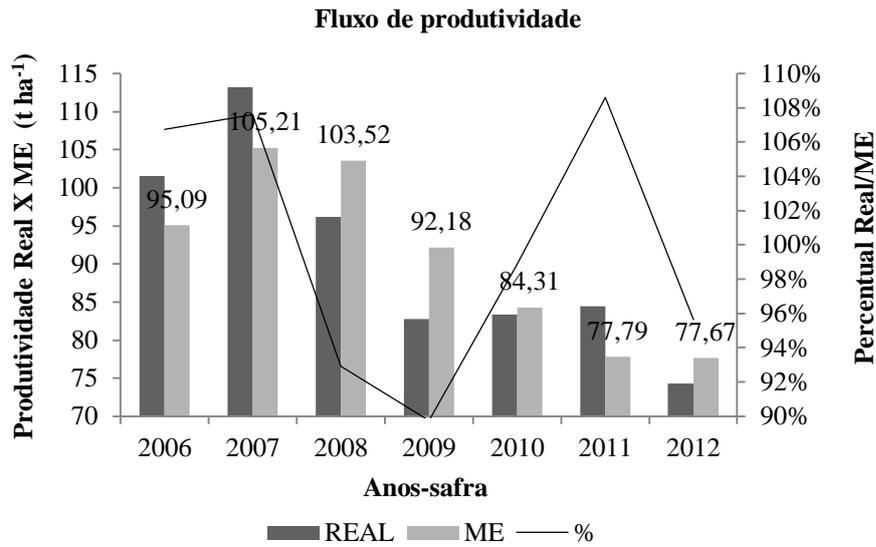


Figura 11: Variação percentual da produtividade real e a estimada pelo modelo espectral (ME).

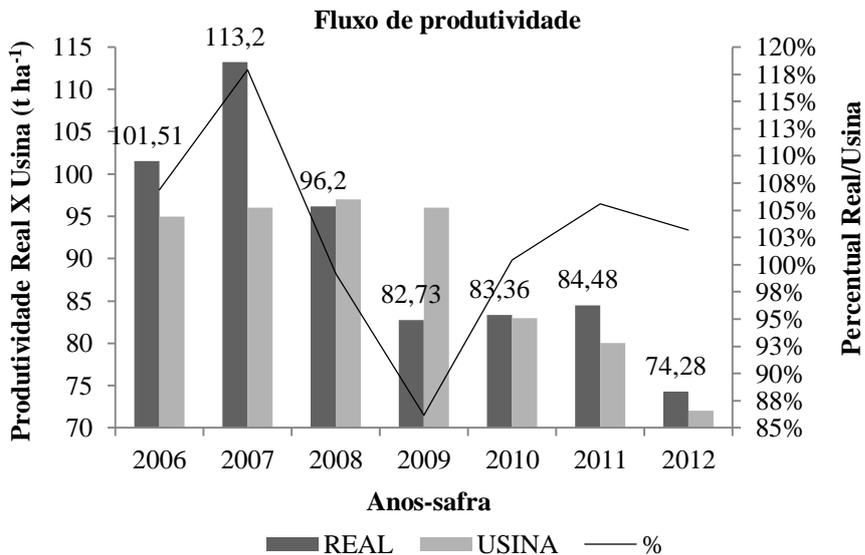


Figura 12: Variação percentual da produtividade real e a estimada pelos técnicos da usina.

Como verificado entre os modelos agrometeorológicos e o espectral, o segundo se aproximou da estimativa feita pelos técnicos da usina levando em consideração a variação percentual das produtividades.

6.2.3. Modelo agrometeorológico espectral

Acrescido de uma variável espectral ao modelo agrometeorológico (MA) é apresentado na Tabela 11, o modelo agrometeorológico-espectral (MAE) de regressão linear múltipla para a estimativa de produtividade no segundo mês antecedente à colheita. O modelo apresentou-se significativo ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$) com intervalo de confiança de 95% para o valor estimado apresentando bom coeficiente de determinação (R^2), em torno de 99%, semelhante ao ocorrido anteriormente no modelo agrometeorológico (MA) que proporcionou ótima calibração.

Tabela 11: Coeficientes do modelo agrometeorológico-espectral (MAE) com as respectivas probabilidades de erro (p), correlações lineares (r), índice de concordância de Willmott (d) e Erro Padrão de estimativa

Variáveis independentes (MAE)	β	p de erro
α	749,3973	0,000558
IP	0,1778	0,031276
T	-2,6623	0,001017
DEF	2,4028	0,001382
NDVI	0,1649	0,051588
r = 0,99		R² = 0,99
p < 0,0023		d = 0,99
Erro Padrão de estimativa: 0,7806		

IP = Irrigação + Precipitação (mm); T = Temperatura média do ar (C°); DEF = Déficit de saturação de vapor do ar (hPa); NDVI = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.

Na Tabela 11, citada acima se encontram o coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância (d) dos modelos; segundo proposto por Camargo e Sentelhas (1997) o índice de desempenho ou confiança (c) do modelo de estimativa de produtividade ficou em torno de 0,9801, classificado como ótimo para o período analisado, obtendo similaridade com os valores encontrados para o modelo agrometeorológico (MA) citado na Tabela 5.

Diferentemente do ocorrido no modelo agrometeorológico (MA) todas as variáveis presentes no modelo agrometeorológico-espectral se apresentaram altamente significativas

contribuindo, conseqüentemente, para o melhor desempenho na estimativa das produtividades perante as produtividades reais.

Na Tabela 12 são comparados os resultados reais e estimados, no período de 2005/2006 a 2011/2012 pelo modelo agrometeorológico-espectral (MAE). Os erros de ajustes ou previsão são medidos pelo desvio:

$$\text{Desvio} = (\text{Produtividade real}) - (\text{Produtividade estimada}).$$

Tabela 12: Resultados dos valores reais X valores estimados para o modelo agrometeorológico-espectral (MAE) para os anos-safra de 2005/2006 a 2011/2012

Ano-Safra	Produtividade (t ha ⁻¹)		Residuais	Residuais Padronizados
	Real	Estimada (MAE)		
2005/2006	101,51	100,63	0,880325	1,127783
2006/2007	113,20	113,54	-0,337509	-0,432382
2007/2008	96,20	96,64	-0,434731	-0,556933
2008/2009	82,73	82,79	-0,060150	-0,077058
2009/2010	83,36	83,61	-0,251274	-0,321907
2010/2011	84,48	84,22	0,264946	0,339422
2011/2012	74,28	74,34	-0,061600	-0,078915

Tal como descrito na Tabela 12, observa-se que na maioria dos anos-safra estudados, os erros de ajustes não alcançaram 01 desvio padrão, conseqüência da boa significância atribuída ao modelo.

Na Figura 13A seguem os gráficos dos valores correspondentes às produtividades reais e as estimadas, respectivamente. Por apresentar ótimo coeficiente de determinação (R^2), as variáveis do modelo agrometeorológico-espectral (MAE) explicam 99% sem apresentar desvios significativos de ajustes, sendo consideradas satisfatórias as variáveis, aproximando bem da produtividade real fornecida pela usina, corroborando com o ajuste próximo de 1, de acordo com a metodologia proposta por Willmott et al. (1985).

Com o subsídio da Figura 13B foi representado o desempenho da usina apesar de apresentar uma proximidade dos valores reais com os estimados pelos técnicos justificando, assim, o coeficiente de 99% do índice de concordância de Willmott et al. (1985), foi possível identificar alguns desvios importantes de ajuste; em contrapartida, isto pode ocorrer com respeito à previsão de valores futuros.

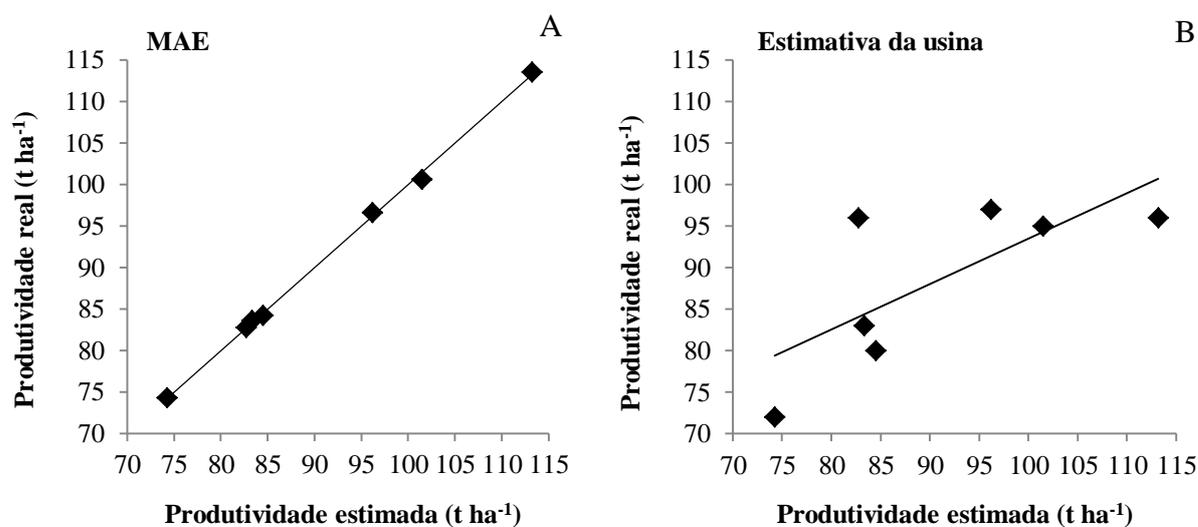


Figura 13: Modelo agrometeorológico-espectral (MAE) e da estimativa da usina com os valores reais em relação aos valores estimados.

Segundo Rizzi (2004) a incorporação de variáveis espectrais ao modelo agrometeorológico pode torná-lo mais eficiente e condizente com o cenário agrícola em que se dá o desenvolvimento da cultura concordando com o desempenho do modelo agrometeorológico-espectral ilustrado anteriormente pela Figura 13, mostrando-o mais dinâmico, em termos espaciais e temporais.

De acordo com os anos-safra testados para calibração do modelo agrometeorológico-espectral (MAE) para estimativa de produtividade se encontram na Tabela 13, as respectivas diferenças média absoluta (DAM), diferença média relativa (DMR) e raiz da diferença quadrática média (RDQM).

Como observado através dos valores encontrados no processo de calibração dos modelos estatísticos testados a fim de estimar a produtividade agrícola da cana-de-açúcar afirmando a possibilidade de relação quantitativa entre a produtividade e variabilidade climática associada com o manejo agrônômico corroborando com estudos desenvolvidos por Oliveira et al. (2013).

Tabela 13: Valores da produtividade real ($t\ ha^{-1}_{real}$) e da produtividade estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral (MAE) e da usina, com suas respectivas diferenças média absoluta (DMA), diferença média relativa (DMR) e raiz da diferença quadrática média (RDQM), para os anos-safra estudados

Ano-Safra	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)		DMA	DMR (%)	RDQM
	Real	Estimada (MAE)			
2005/2006	101,51	100,63	0,88	0,87	0,77
2006/2007	113,20	113,54	0,34	0,30	0,12
2007/2008	96,20	96,64	0,44	0,46	0,19
2008/2009	82,73	82,79	0,06	0,07	0,00
2009/2010	83,36	83,61	0,25	0,30	0,06
2010/2011	84,48	84,22	0,26	0,31	0,07
2011/2012	74,28	74,34	0,06	0,08	0,00

Ano-Safra	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)		DMA	DMR (%)	RDQM
	Real	Estimada (Usina)			
2005/2006	101,51	95,00	6,51	6,41	42,38
2006/2007	113,20	96,00	17,20	15,19	295,84
2007/2008	96,20	97,00	0,80	0,83	0,64
2008/2009	82,73	96,00	13,27	16,04	176,09
2009/2010	83,36	83,00	0,36	0,43	0,13
2010/2011	84,48	80,00	4,48	5,30	20,07
2011/2012	74,28	70,00	2,28	3,07	5,20

Entre os anos-safra testados pelo modelo agrometeorológico-espectral (MAE), todas as safras obtiveram bom desempenho, destaque para as colheitas de 2008/2009 e 2011/2012, que apresentaram as menores diferenças médias relativas de 0,07 e 0,08 %, respectivamente. Como pode ser observado na Tabela 13, acima, a safra de 2005/2006 apresentou a maior diferença média relativa de 0,87% e as safras de 2006/2007 e 2009/2010 apresentaram a diferença média relativa de 0,30%, respectivamente. Analisando os valores reais em relação aos estimados pela própria usina, as menores diferenças médias relativas encontradas foram de 0,43% na safra de 2009/2010 seguida da safra de 2007/2008, que foi 0,83%, cujas maiores diferenças médias relativa foram de 15,19% e 16,04% nas safras de 2006/2007 e 2008/2009, respectivamente.

Ao observar as diferenças médias relativas ao modelo, é perceptível que não ocorreu uma diferença abrupta entre os valores quando comparados com os valores encontrados na estimativa da usina.

Os modelos agrometeorológicos-espectrais, além de fornecer dados para alimentar os sistemas de previsão de safras agrícolas, permitem identificar estresse hídrico ao longo do ciclo

da cultura, ou seja, as propriedades físicas da água a serem utilizadas nas análises econômicas são particularmente importantes em análises de produção agrícola quando a água é escassa (Doorenbos e Kassam, 1979).

A Figura 14 apresenta o comparativo da variação percentual entre as produtividades reais e as estimadas pelo modelo agrometeorológico-espectral (MAE) nas safras de 2005/2006 a 2011/2012. Percebe-se uma variação percentual mínima próximo de 1%, resultante da boa precisão na estimativa da produtividade quando comparada com o modelo agrometeorológico (MA) que variou em até 5%, corroborando com o Erro Padrão de Estimativa de aproximadamente de quase 01 (uma) tonelada de cana para mais ou para menos, descrito na Tabela 11, já citada.

Na calibração do modelo agrometeorológico-espectral (MAE) e de acordo com a Figura 15, o comparativo da variação percentual da produtividade real e a estimada pelos técnicos da usina para o mesmo período agrícola utilizado, foi constatado que essa variação percentual entre as produtividades ficou próxima de até 22% em algum ano, influenciando diretamente em um erro subestimado de até 17 toneladas de cana, como foi identificado também na calibração do modelo agrometeorológico (MA).

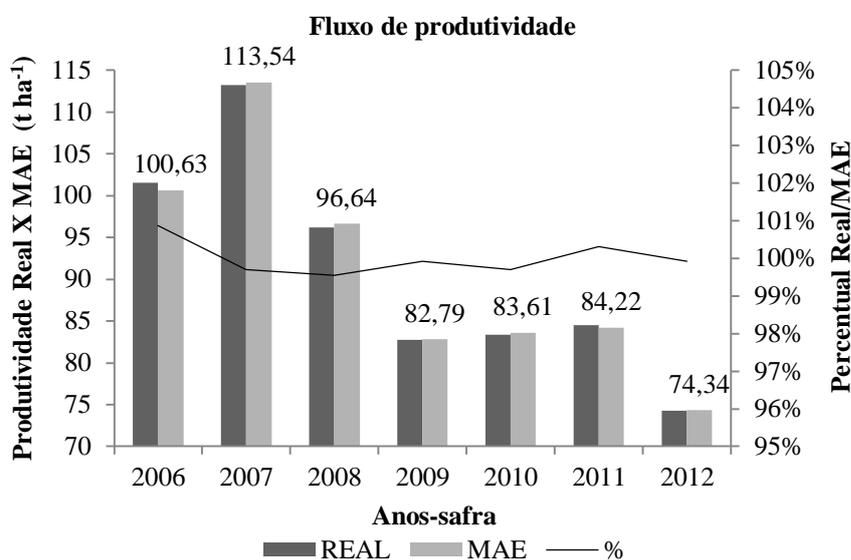


Figura 14: Variação percentual da produtividade real e a estimada pelo modelo agrometeorológico (MAE).

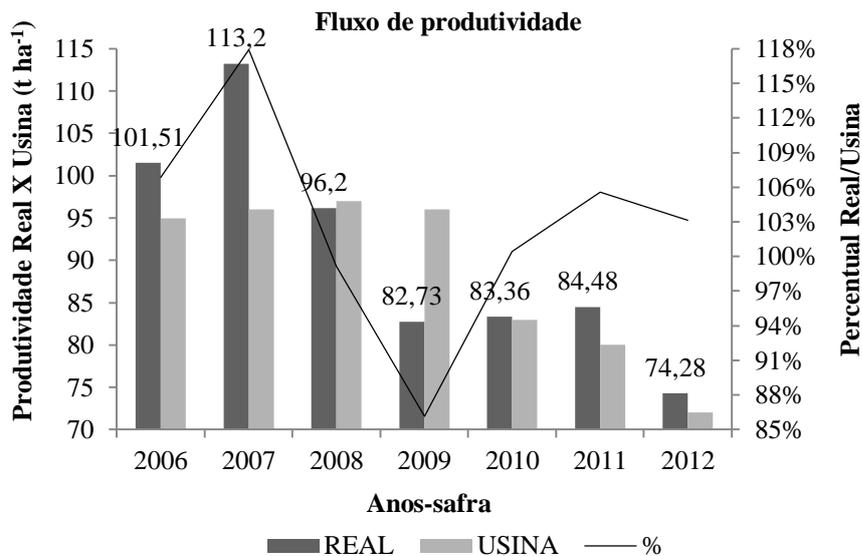


Figura 15: Variação percentual da produtividade real e a estimada pelos técnicos da usina.

De acordo com Surkey e Verma (2008) nos modelos agrometeorológicos-espectral estão contidas diversas variáveis, seja meteorológica quanto espectral, com a possibilidade de descrever o comportamento da cultura quanto da variabilidade climática na região em função dos eventos meteorológicos.

6.3. Validação dos modelos estatísticos de estimativa de produtividade

Na Tabela 14 se encontram os valores de produtividade agrícola obtidos por cada modelo, desenvolvido para os anos das safras correspondentes à 2004/2005, 2013/2014 e 2014/2015. No ano-safra de 2004/2005 os modelos se aproximaram mais da produtividade real quando comparados com os anos-safra de 2013/2014 e 2014/2015. Como verificado durante o período de calibração dos modelos, a partir do ano-safra de 2005/2006 a 2011/2012, período no qual ocorreu a última colheita desse ciclo fenológico, refletindo na renovação com novo plantio no início obtendo a primeira colheita (1ª folha ou colheita) a partir do ano de 2014, com nova variedade e conseqüentemente uma fisiologia produtiva diferenciada justificando, assim, as produtividades significativas para os anos-safra de 2013/2014 e 2014/2015, respectivamente. Analisando a relação entre as safras 2013/2014 e 2014/2015, é possível observar uma queda de produção de 0,65596 ou -65%, ou seja, uma redução de aproximadamente 90 toneladas de cana.

Tabela 14: Valores da produtividade agrícola (toneladas por hectare) calculada com os diferentes modelos para os anos-safra de 2004/2005, 2013/2014 e 2014/2015

Ano-safra	MA	ME	MAE	Observado
2004/2005	83,19	93,05	82,13	98,00
2013/2014	23,10	77,61	20,99	261,86
2014/2015	27,59	83,31	26,21	171,77

MA = modelo agrometeorológico; ME = modelo espectral e; MAE = modelo agrometeorológico-espectral.

Como constatado na Tabela 14, o valor da produtividade agrícola obtida pelo modelo espectral mostrou-se mais próximo da produtividade real, seguido do agrometeorológico e do agrometeorológico-espectral contrariando os resultados obtidos pelos modelos na calibração que apresentou sequência inversa. Esses resultados concordam com os obtidos por Malibana et al. (2012), em que as variáveis espectrais superaram as agrometeorológicas na explicação das variações anuais do rendimento médio de grãos do milho.

Na tabela 15 são descritos os valores observados e estimados da produtividade agrícola com suas respectivas diferenças. Observa-se que o modelo espectral apresentou a menor diferença média relativa, na ordem de 5,05% no ano-safra de 2004/2005. A maior diferença média relativa foi registrada no ano-safra de 2013/2014, na ordem de 91,98%, pelo modelo agrometeorológico-espectral

De acordo com Silva et al. (2014), verificaram, analisando o comportamento da cana-de-açúcar no semiárido, que a biomassa das folhas, colmos e parte aérea e o índice de área foliar apresentaram resultados satisfatórios em função da interação da eficiência fotossintética e eficiência da radiação solar, em respostas das condições meteorológicas local aliados as características intrínsecas da variedade. Esses resultados apresentados concordam com o desempenho do modelo espectral e superaram os valores encontrados pelos demais modelos agrometeorológico e agrometeorológico-espectral, respectivamente.

Tabela 15: Valores da produtividade real ($t\ ha^{-1}_{real}$) e das produtividades estimadas pelos modelos: agrometeorológico (MA), espectral (ME), agrometeorológico-espectral (MAE) e da usina, com suas respectivas diferenças média absoluta (DMA), diferença média relativa (DMR) e raiz da diferença quadrática média (RDQM), para os anos-safra de 2004/2005, 2013/2014 e 2014/2015

Ano-Safra	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)		DMA	DMR (%)	RDQM
	Real	Estimada (MA)			
2004/2005	98,00	83,19	14,81	15,11	219,34
2013/2014	261,86	23,10	238,76	91,18	57006,34
2014/2015	171,77	27,59	144,18	83,94	20787,87
Ano-Safra	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)		DMA	DMR (%)	RDQM
	Real	Estimada (ME)			
2004/2005	98,00	93,05	4,95	5,05	24,50
2013/2014	261,86	77,61	184,25	70,36	33948,06
2014/2015	171,77	83,31	88,46	51,50	7825,17
Ano-Safra	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)		DMA	DMR (%)	RDQM
	Real	Estimada (MAE)			
2004/2005	98,00	82,13	15,87	16,19	251,86
2013/2014	261,86	20,99	240,87	91,98	58018,36
2014/2015	171,77	26,21	145,56	84,74	21187,71
Ano-Safra	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)		DMA	DMR (%)	RDQM
	Real	Estimada (Usina)			
2004/2005	98,00	96,00	2,00	2,04	4,00
2013/2014	261,86	235,00	26,86	10,26	721,46
2014/2015	171,77	180,00	8,23	4,79	67,73

Os maiores percentuais da diferença média relativa foram encontrados para as safras de 2013/2014 e 2014/2015, respectivamente, variando na ordem de 70,36% a 91,98%, oscilação esta em função da nova variedade que foi plantada e idade das plantas. Quando observado, a análise dos técnicos da usina foi até mais eficiente a estimativa que os próprios modelos, porém se leva em consideração sua experiência de campo e acompanhamento ao longo do ciclo do desenvolvimento do canavial. A variação da diferença média relativa foi na ordem de 2,04% até 10,26% nas três safras testadas; portanto, independente do desempenho dos modelos e dos técnicos da usina, a maior diferença ficou mais visível por conta dos anos-safra do que entre os modelos em relação à produtividade real.

A Figura 16 corresponde à variação dos rendimentos agrícolas através das estimativas feitas pelo modelo agrometeorológico (MA); observa-se que nas safras de 2013/2014 e 2014/2015 houve uma subestimativa nos valores da produtividade; na safra de 2004/2005 ocorreu uma diferença de quase 15 toneladas superestimando a estimativa do erro padrão de quase 03 toneladas de cana. De modo geral, o modelo apresentou-se significativo para estimar a produtividade desta área de estudo quando levados em consideração as variáveis intrínsecas de sua calibração.

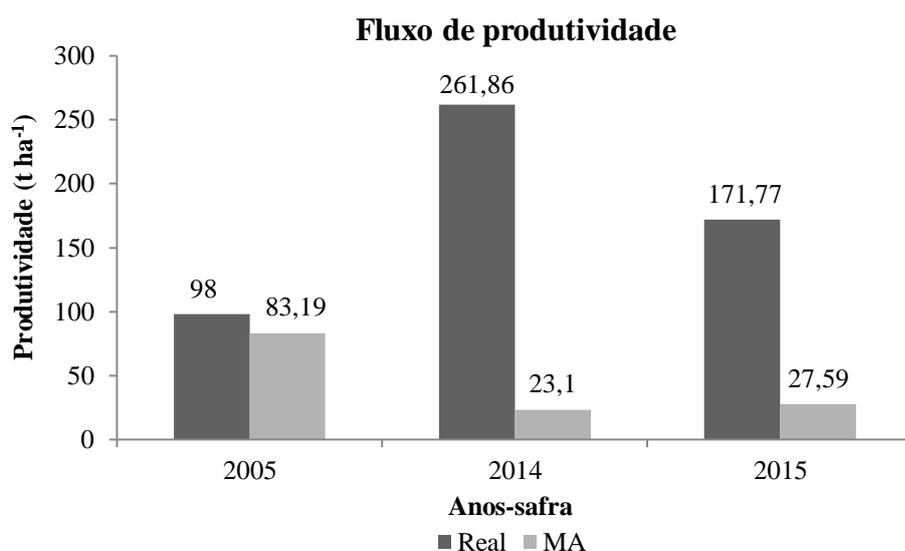


Figura 16: Produtividade agrícola real e a estimada pelo modelo agrometeorológico (MA).

Como ilustra a Tabela 16, para corrigir esse efeito das safras de 2013/2014 e 2014/2015, foi feita a razão das produtividades real com a estimada pelo modelo agrometeorológico gerando um fator de correção de 11,34 e 6,23, respectivamente. Como ocorreu redução representativa de produção de 90 toneladas de cana de uma safra para outra, o fator de correção também registou uma redução significativa de 54,94%.

Tabela 16: Correção de safra pelo modelo agrometeorológico (MA)

Ano-safra	Produtividade (t ha ⁻¹)		Fator	Produtividade Corrigida
	Real	Estimada		
2013/2014	261,86	23,10	11,34	261,95
2014/2015	171,77	27,59	6,23	171,89

A Figura 17 ilustra o comportamento do modelo espectral (ME) que apresentou o melhor desempenho entre a correlação das produtividades reais e estimadas, respectivamente. Percebe-se que na safra de 2004/2005 houve uma diferença de 5 toneladas de cana, subestimando tanto a produtividade real que foi de 98 t ha⁻¹ quanto o erro de estimativa, que era de aproximadamente 09 toneladas de cana, semelhante aos resultados encontrados por Malibana et al. (2012) em trabalho realizado em Moçambique na África. Da mesma forma como no modelo agrometeorológico, o modelo espectral não apresentou resultado satisfatório nas safras de 2013/2014 e 2014/2015, após a renovação do campo.

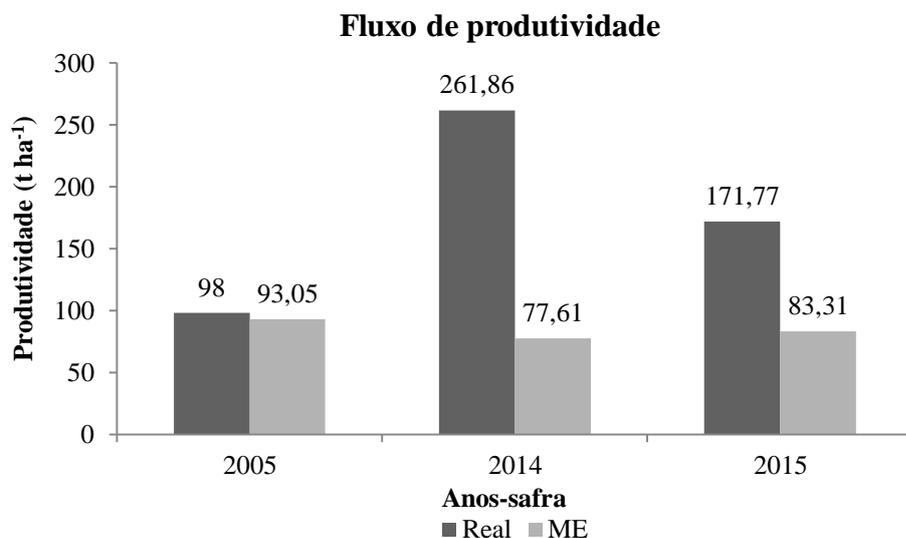


Figura 17: Produtividade agrícola real e a estimada pelo modelo espectral (ME)

Rudorff e Batista (1990) utilizaram um modelo agrometeorológico para estimar a produtividade da cana-de-açúcar em lavouras comerciais em quatro anos-safra e que para os três primeiros anos-safra os coeficientes de determinação entre a produtividade observada e a estimada pelo modelo espectral e pelo modelo agrometeorológico variaram entre 0,14 e 0,59 e entre 0,28 e 0,64, respectivamente.

A Figura 18 corresponde à variação da produtividade do modelo agrometeorológico-espectral ao longo das safras avaliadas para a validação. Percebe-se que seu desempenho foi muito semelhante ao do modelo agrometeorológico, mesmo com o complemento da variável espectral do NDVI e não se mostrou eficiente tanto quanto o modelo espectral com a presença das variáveis do IAF e FC. No ano-safra de 2004/2005 o modelo subestimou a produtividade

observada em 16 toneladas de cana discordando do erro de estimativa de quase 01 tonelada de cana quando foi calibrado nas safras de 2005/2006 a 2011/2012.

De acordo com a Tabela 17, entre os modelos testados o espectral apresentou o menor e mais preciso coeficiente de correção para as safras de 2013/2014 e 2014/2015, fazendo-se a razão das produtividades real com a estimada gerando um fator de correção de 3,37 e 2,06, respectivamente. Como ocorreu uma redução representativa de produção de 90 toneladas de cana de uma safra para outra, o fator de correção também registou uma redução significativa de 61,13%.

Tabela 17: Correção de safra pelo modelo espectral (ME)

Ano-safra	Produtividade (t ha ⁻¹)		Fator	Produtividade Corrigida
	Real	Estimada		
2013/2014	261,86	77,61	3,37	261,55
2014/2015	171,77	83,31	2,06	171,62

Para o modelo agrometeorológico-espectral não foi diferente dos demais pois também apresentou uma subestimativa nas produtividades estimadas nas safras de 2013/2014 e 2014/2015, conforme descrito na Figura 18.

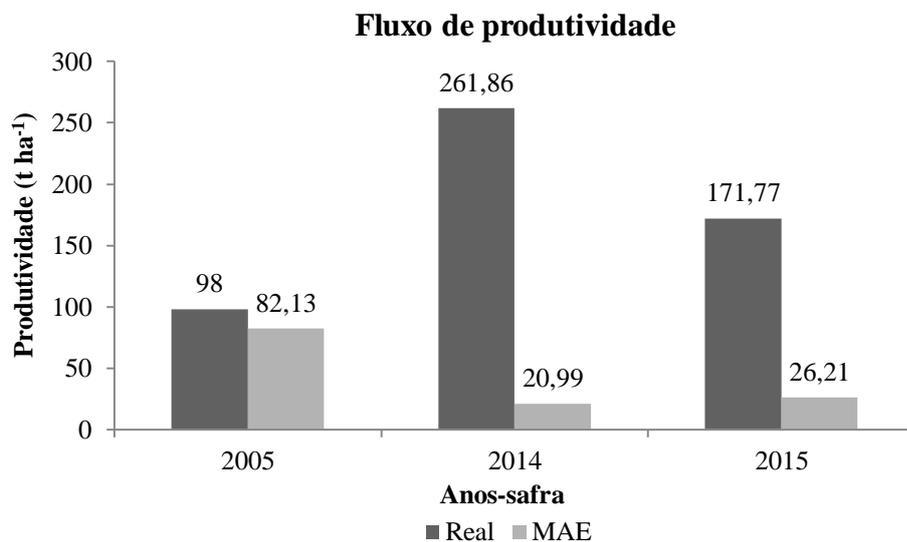


Figura 18: Produtividade agrícola real e a estimada pelo modelo agrometeorológico-espectral (MAE).

De acordo com a Tabela 18 e diferentemente do modelo espectral e mais próximo do modelo agrometeorológico, o modelo agrometeorológico-espectral apresentou os fatores de correção de 12,48 e 6,55 para as safras de 2013/2014 e 2014/2015, respectivamente, quando feita a razão da produtividade real e a estimada. Corroborando com a redução representativa de produção de 90 toneladas de cana de uma safra para outra, o fator de correção também registrou uma redução significativa de 52,48%.

Tabela 18: Correção de safra pelo modelo agrometeorológico-espectral (MAE)

Ano-safra	Produtividade (t ha ⁻¹)		Fator	Produtividade Corrigida
	Real	Estimada		
2013/2014	261,86	20,99	12,48	261,95
2014/2015	171,77	26,21	6,55	171,68

Rudorff e Batista (1990) observaram, usando dados espectrais de imagens do Landsat com resolução espacial de 30 metros, que a análise de regressão entre a produtividade real e a produtividade do modelo agrometeorológico-espectral apresentou os escores dos coeficientes de determinação que variaram entre 0,50 e 0,69, ou seja, houve uma melhora substancial dos valores.

Assim como planejamento agrícola, os técnicos fazem as estimativas da previsão de agrícola para dimensionar a logística de colheita. De acordo com a Figura 19, nas safras de 2004/2005, 2013/2014 e 2014/2015, foi possível observar que a diferença relativa entre as produtividades reais e estimadas foi mínima, mas quando ocorrem eventos meteorológicos anormais influenciam diretamente nessas estimativas aumentando o desvio e, consequentemente, o percentual do erro médio relativo, como foi percebido durante o período de calibração dos modelos nas safras de 2005/2006 a 2011/2012.

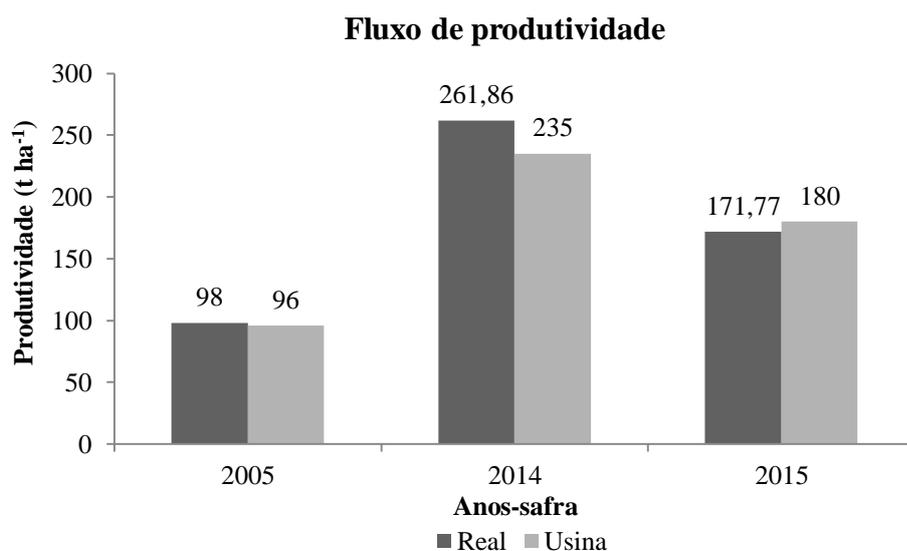


Figura 19: Produtividade agrícola real e a estimada pelos técnicos da usina.

A estimativa dos técnicos é feita ao longo do desenvolvimento do canavial, desde o plantio até próximo da colheita levando-se em conta alguns indicadores agrônômicos e climáticos inerentes à cultura.

Usando o modelo de simulação de produtividade DSSAT/CANEGRO, Gomes et al. (2014) analisaram o comportamento de quatro variedades de cana-de-açúcar em épocas de plantio diferenciada e dois ambientes de produção distinto (irrigado e sequeiro) na região nordeste do Brasil e observaram que em ambiente de sequeiro a produtividade foi afetada significativamente quando comparada às áreas irrigadas devido ao déficit hídrico, seja pela baixa precipitação e/ou pela falta de irrigação.

Confirmando o que Fontana et al. (2001) relatam que diferenças entre variedades, manejo, tipo de solo, fertilidade, clima e outras variáveis, até mesmo dentro da mesma localidade ou região, salientando a importância de calibração e/ou de fatores de cada localidade e assim obter estimativas mas precisas.

7. CONCLUSÕES

Conclui-se que:

- O modelo agrometeorológico e o modelo agrometeorológico-espectral apresentaram boa explicação da produtividade estimada em relação à produtividade real para o período de calibração;
- O modelo espectral não apresentou uma resposta satisfatória no período da calibração quando comparado com os outros modelos;
- A estimativa da produtividade feita pelos técnicos da usina apresentou uma variação de até 22%, resultando em um erro de 17 toneladas de cana para mais ou menos, na época de calibração;
- No período da validação, no ano-safra de 2004/2005, o modelo espectral apresentou a melhor explicação da produtividade estimada quando comparada com a real;
- Os modelos agrometeorológicos e agrometeorológico-espectral apresentaram boas respostas da produtividade estimada de 83,19 e 82,13 t ha⁻¹, respectivamente, quando comparadas com produtividade a real de 98 t ha⁻¹ no período de validação no ano-safra de 2004/2005;
- Nos anos-safra de 2013/2014 e 2014/2015, todos os modelos subestimaram suas produtividades quando correlacionadas com a real, justificado pela renovação de plantio na área de estudo;
- Com o subsídio do fator de correção de safra, as produtividades subestimadas nos anos-safra de 2013/2014 e 2014/2015 foram corrigidas tornando-se significativas quando comparadas com a produtividade real;
- O valor do fator de correção de safra é reduzido temporalmente ao passar dos anos-safra e os modelos se ajustaram sem a necessidade da correção da produtividade estimada por eles;
- Todos os modelos testados se mostraram eficientes para a estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar cujas diferenças relativas foram mínimas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- André, R. G. B.; Mendonça, J. C.; Marques, V. S.; Pinheiro, F. M. A.; Marques, J. Aspectos energéticos do desenvolvimento da cana-de-açúcar. Parte 1: Balanço de radiação e parâmetros derivados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.25, n.3, p. 375 - 382, 2010.
- Araújo, M. A.; Souza, J. L. M.; Tsukahara, R. Y. Modelos agro-meteorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa, Estado do Paraná. *Revista Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 33, n. 1, p. 23-31, 2011.
- Bassanezi, R. C.; Ferreira Junior, W. C. *Equações diferenciais com aplicações*. São Paulo: Ed. Harbra, 1988. 572 p.
- Bailey, T.C.; Gatrell, A.C. *Interactive spatial data analysis*. London: Editora Longman, 1995. 413 p.
- Barbieri, V. Medidas de estimativas de consumo hídrico na cana-de-açúcar (*saccharum spp*). 1981. 82 f. Dissertação (Mestrado em Estatística Experimentos) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Barbieri, V.; Villa Nova, N. A. Climatologia e a cana-de-açúcar. In: *Planalsucar*, Coordenadoria Regional Sul. COSUL. Araras. 1977. p.1-22.
- Brunini, O. Ambientes climáticos e exploração agrícola da cana-de-açúcar. In: Dinardo Miranda, L. L.; Vasconcelos, A. C. M.; Landell, M. G. A. *Cana-de-açúcar*. 1ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 2010. Cap.7, p. 205-218.
- Camargo, A. P.; Sentelhas, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 5, n. 1, p. 89 - 97, 1997.
- Câmara, G. Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos. 1995 281 p. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. Disponível na biblioteca digital URib: <www.dpi.inpe.br/teses/gilberto/>1995.

- Câmara, G.; Davis, C. Introdução ao geoprocessamento In: Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A.M.V. Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos: INPE, 2001 (INPE8568-PRE/4312). Disponível na biblioteca digital URLib: <www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap1-introducao.pdf>.
- Câmara, G.; Medeiros, J.S. de; Princípios Básicos em Geoprocessamento. In: Assad, E.D.; Sano, E.E. Sistema de Informações Geográficas - Aplicações na Agricultura. Brasília: EMBRAPA-SPI/EMBRAPA Cerrados, p. 3-11, 2 ed. 1998, 434 p.
- Cardozo, N. P.; Sentelhas, P. C. Efeitos do clima na maturação da cana, sob a influência de cultivares e da idade de colheita. Revista Scientia Agricola, v. 70, n. 6, 2013.
- Cardozo, N.P.; Modeling. Amadurecimento de cana como função de variáveis meteorológicas. 2012. Disponível em: < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11131/tde-14032012-080359/> > Acessado 7 de novembro de 2014.
- Choudhury, B. J.; Ahamed, N. U.; Idso, S. B.; Reginato, R. J.; Daughtry, C. S. T.; Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. Remote Sensing of Environment, v.50, n. 1, p. 1-17, 1994.
- Doorenbos, J.; Kassan, A. H. Yield response to water. Rome: FAO, 1979. 193 p. (Irrigation and drainage paper, 33).
- Esteves, B. S.; Sousa, E. F.; Mendonça, J. C.; Lousada, L. L.; Muniz, R. A.; Silva, R. M. Variações do albedo, NDVI e SAVI durante um ciclo da cana-de-açúcar no Norte Fluminense. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, Recife - PE, v.7, n.4, p.663-670, 2012.
- Esteves, B. S.; Sousa, E. F.; Mendonça, J. C.; Lousada, L. L.; Muniz, R. A.; Silva, R. M. Desenvolvimento e balanço de energia da cana-de-açúcar no norte fluminense, Brasil. Revista Interciência, Venezuela, v. 37, n. 6, p. 438-443, 2012.
- Fauconnier, R.; Bassereau, D. La canne à sucre. Paris: Ed. Maisonneuve et Larose, 1970. (Collection techniques agricoles et productions tropicales).
- Fontana, D. C.; Berlato, M. A.; Lauschner, M. H.; Mello, R. W. Modelo de estimativa de rendimento da soja no Estado do Rio Grande do Sul. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 36, n. 3, p. 399-403, 2001.

- Frizzone, J. A.; Andrade Júnior, A. S.; Souza, J. L. M.; Zocoler, J. L. Funções de produção água-cultura. In: Frizzone, J. A.; Andrade Júnior, A. S.; Souza, J. L. M.; Zocoler, J. L. (Ed.). Planejamento de irrigação: análise e decisão de investimento. Brasília: Embrapa, 2005. p. 283-314.
- Gomes, A. W. A.; Saad, J. C. C.; Barros, A. C. Simulação da produtividade de cana-de-açúcar (*saccharum officinarum l.*) na região nordeste do brasil, utilizando o modelo DSSAT. Revista Irriga, Botucatu, v. 19, n. 1, p. 160-173, 2014.
- Goodchild, M.F. Geographical data modeling. Computers & Geosciences. n. 18, v. 4, p. 401-408, May 1992.
- Guerra, A.; Barbosa, A. M.; Guidorizi, K. A.; Souza, G. M. Efeitos da temperatura do ar na fotossíntese da cana-de-açúcar na fase inicial do desenvolvimento. Revista Agrarian, v.7, n.24, p.211-217, 2014.
- Holanda, L. A.; Santos, C. M.; Sampaio Neto, G. D.; Sousa, A. P.; Silva, M. A. Variáveis morfológicas da cana-de-açúcar em função do regime hídrico durante o desenvolvimento inicial. Revista Irriga, v.19, n.4, p.573-584, 2014.
- Huete, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, v. 25, n. 3, p. 295-309, Aug. 1988.
- Huete, A. R.; Didan, K.; Miura, T., Rodriguez, E.P.; Gao, X.; Ferreira, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetations indices. Remote Sensing of Environment, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.
- Inman-Bamber, N. G.; Smith, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. Field Crops Research, Intl., v.92, n. 02, p. 185-202, 2005.
- Jadoski, C. J.; Toppa, E. V. B.; Julianetti, A.; Hulshof, T.; Ono, E. O.; Rodrigues, J.D. Fisiologia do desenvolvimento do estágio vegetativo da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum l.*). Revista Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia, v. 3, n. 2, p. 169-176, 2010.
- Junges, A. H.; Fontana, D. C. Modelo agrometeorológico-espectral de estimativa de produtividade de grãos de trigo no Rio Grande do Sul. Revista Ceres, v. 58, n. 1, p. 9-16, 2011.

- Land Processes Distributed Active Archive Center – LP DAAC. MODIS Reprojection Tool. 2014. Disponível em: < https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool>. Acesso em: Julho 2014.
- Latorre, M. L.; Anderson, L. O.; Shimabukuro, Y. E.; Carvalho Júnior, O. A. Sensor MODIS: características gerais e aplicações. Revista Espaço & Geografia, INPE, v. 6, n. 1, p. 91-121, 2003.
- Liu, W.T.H. Previsão de safra agrícola. In: Aplicações de sensoriamento remoto. 1ª ed. Campo Grande, Uniderp. p.561-649. 2007.
- Lucas, A. A.; Schuler, C. A. B. Análise do NDVI/NOAA em cana-de-açúcar e Mata Atlântica no litoral norte de Pernambuco, Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.11, n.6, p.607-614, 2007.
- Machado, D. F. S. P.; Lagôa, A. M. M. A.; Ribeiro, R. V.; Marchiori, P. E. R.; Machado, R. S.; Machado, E. C. Baixa temperatura noturna e deficiência hídrica na fotossíntese da cana-de-açúcar. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 48, n.5, p.487-495, 2013.
- Machado, R.S.; Ribeiro, V.; Marchiori, P.E.R.; Machado, D.F.S.P.; Landell, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 44, n. 12, p.1575-1582, 2009.
- Magalhães, A. C. N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: Castro, P. R. C.; Ferreira, S. O.; Tsuioshi, Y. Ecofisiologia da produção agrícola. Piracicaba: POTAFOS, 1987. 249 p.
- Malibana, H. A.; Fontana, D. C.; Fonseca, E. L. Desenvolvimento de modelo agrometeorológico espectral para estimativa de rendimento do milho na Província de Manica-Moçambique. Revista Ceres, Viçosa, v.59, n.3, p.337-349, 2012.
- Marcari, M. A. Modelos agrometeorológicos estatísticos de previsão de produtividade e qualidade para cana-de-açúcar. Universidade Estadual Paulista- UNESP, Jaboticabal – SP. Dissertação de Mestrado em Agronomia, 2015, 47 p.

- Moreira, R. C. Influência do posicionamento e da largura de bandas de sensores remotos e dos efeitos atmosférico na determinação de índice de vegetação. São José dos Campos: INPE, 2000. Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, 2000, 181 p.
- Moreira, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 4.ed. Viçosa: UFV, 2011. 422p.
- Melo, R. W.; Fontana, D. C.; Berlato, M. A. & Ducati, J. R. Na agrometeorological–spectral model to estimate soybean yield, applied to southern Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 29:4013-4028, 2008.
- Meneses, P. R.; Almeida, T.; Rosa, A. N. C. S.; Sano, E. E.; Souza, E. B.; Baptista, G. M. M.; Brites, R. S. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. 1. ed. Brasília: UnB, 2012. 276p.
- Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer - MODIS. Technical Specifications, 2013. Disponível em: <<http://MODIS.gsfc.nasa.gov/data>>. Acesso em: jan. 2013.
- Monteiro, J. E. B. A. Agrometeorologia dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola. In: Marin, F. R.; Pellegrino, G. Q.; Assad, E. D.; Pinto, H. S.; Zullo Junior, J. 1. ed. Cana-de-açúcar. Brasília – DF. Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, 2009. Cap. 7, p. 110-128.
- Moreira, L. F. Multicolinearidade em análise de regressão. In: 12º Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional, Foz do Iguaçu. Anais, Unioeste. p.61-75, 2008.
- Nassif, D. S. P.; Marin, F. R.; Pallone Filho, W. J.; Resende, R. S.; Pellegrino, G.Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. *Revista Pesquisa agropecuária brasileira*, Brasília, v.47, n.3, p.311-318, 2012.
- Neto, J. D.; Teodoro, I.; Farias, C. H. A. Sistema produtivo da cana-de-açúcar. In: Curso de especialização em gestão na indústria sucroalcooleira. UFCG, Modulo III, Cap.1, p.1-7. 2010.
- Norman, J. M.; Anderson, M. C.; Kustas, W. P.; French, A. N.; Mecikalski, J.; Torn, R.; Diak, G. R.; Schmugge, T. J. Remote sensing of evapotranspiration for precision-farming

- applications, International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse, 2003. Proceedings...Toulouse, 2003.
- Oliveira, H. F.; Mantovani, E. C.; Sedyama, G. C. Avaliação de modelos de estimativa de produtividade da cana-de-açúcar irrigada em Jaíba-MG. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, Fortaleza, v. 7, n. 2, p. 112-127, 2013.
- Picoli, M. C. A.; Rudorff, B. F. T.; Rizzi, R.; Giarolla, A. Índice de vegetação do sensor MODIS na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar. Revista Bragantia, Campinas, v.68, n.3, p.789-795, 2009.
- Ponzoni, F. J.; Shimabukuro, Y. E.; Kuplich, T. M. Sensoriamento remoto da vegetação. 2. ed. São Paulo. 2012. 176p.
- Prado, H.; Pádua Junior, A. L.; Garcia, J. C.; Moraes, J. F. L.; Carvalho, J. P.; Donzeli, P. L. Solos e ambientes de produção. In: Dinardo-Miranda, L. L.; Vasconcelos, A. C. M.; Landell, M. G. A. Cana-de-açúcar. 1ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 2010. Cap.7, p. 179-204.
- Remma, F. L. P.; Lamparelli, R. A.C.; Rocha, J. V. Perfis temporais NDVI MODIS, na cana-soca, de maturação tardia. Revista de Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.30, n.3, p.480-494, 2010.
- Rizzi, R.; Geotecnologias em um sistema de estimativa da Produção de soja: estudo de caso no Rio Grande do Sul. São José dos Campos: INPE, 2004. 212p – São Paulo. Tese de doutorado.
- Rizzi, R.; Rudorff, B. F. T.; Adami, M. Estimativa da área de soja no estado do Rio Grande do Sul por amostragem. Ciência Rural, v. 36, n. 1, p. 30-35, 2006.
- Rodrigues, J. D. Fisiologia da cana-de-açúcar. Botucatu: Unesp, 1995. 99p.
- Rudorff, B. F. T.; Batista, G. T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. Remote sens. Environ. 33:183-192, 1990.
- Santos, M. A. L. Irrigação suplementar da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*): um modelo de análise de decisão para o Estado de Alagoas. 2005. 100 f. Tese (Doutorado em Agronomia –

Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Scardua, R.; Rosenfeld, U. Irrigação da cana-de-açúcar In: Paranhos, S. B. (Coord.). Cana-de-açúcar: Cultivo e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 373-431.

Shaw, M. E. A.; Innes, R. F. The growth pattern and yield of annual cane planted at different seasons and the effects of nitrogen treatments. In: Congress of the international society of sugar cane technologists, 12., 1965, San Juan, Puerto Rico. Proceedings...Louisiana: Franklin Press, 1965. p. 401-428.

Silva, V. P. R.; Belo Filho, A. F. B.; Silva, B. B.; Campos, J. H. B. C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.9, n.4, p.547-553, 2005.

Silva, M. A.; Pincelli, R. P. Alterações morfofisiológicas na cana-de-açúcar em resposta à deficiência hídrica. In: Crusciol, C. A. C et al. Tópicos em ecofisiologia da cana-de-açúcar. Botucatu: FEPAF, p. 43-48, 2010.

Silva, T.G.F. da; Moura, M.S.B. de; Zolnier, S.; Soares, J.M.; Souza, L.S.B.; Brandão, E.O. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 15, p. 139-147, 2011.

Silva, T. G. F.; Moura, M. S. B.; Zolnier, S.; Carmo, J. F. A.; Souza, L. S. B. Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no Submédio do Vale do São Francisco. Revista Ciência Agronômica, v. 43, n. 3, p. 500-509, 2012.

Silva, T.G. F.; Zolnier, S.; Moura, M. S. B.; Souza, L. S. B.; Carmo, J. F. A. Índices Morfofisiológicos e Uso de Radiação Solar por um Cultivo de Cana-de-Açúcar Irrigada no Semiárido Brasileiro. Revista Brasileira de Geografia Física, v.07, n.4, p. 764-773, 2014.

Souza, J. L. M.; Gerstemberger, E.; Araujo, M. A. Calibração de modelos agrometeorológicos para estimar a produtividade da cultura do trigo, considerando sistemas de manejo do solo, em Ponta Grossa-PR. Revista Brasileira de Meteorologia, v.28, n.4, 409 - 418, 2013.

- Suyker, A.E.; Verma, S.B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 148, p. 417-427, 2008.
- União dos Produtores de Bioenergia – UDOP, 2013. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=unidades>>. Acesso em: julho. 2013.
- Vianna, M. S.; Sentelhas, P. C. Simulação do risco de déficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. *Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v.49, n.4, p.237-246, 2014.
- Vianello, R. L.; Alves, A. R. *Meteorologia Básica e Aplicações*. 2.ed. Universidade Federal de Viçosa, 2012. 460p.
- Vieira, G. H. S.; Mantovani, E. C.; Sedyama, G. C.; Cecon, P. R.; Delazari, F. T. Época de interrupção da irrigação na cultura da cana-de-açúcar. *Revista Irriga*, Botucatu, v. 18, n. 3, p. 426-441, 2013.
- Willmott, C. J.; Ackleson, S. G.; Davis, R. E. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geography Research*, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

APÊNDICE A – GRÁFICOS DO EXTRATO DO CENÁRIO HÍDRICO PARA O PERÍODO DE CALIBRAÇÃO DOS MODELOS



Figura A1: Extrato do cenário hídrico do ano de 2006.

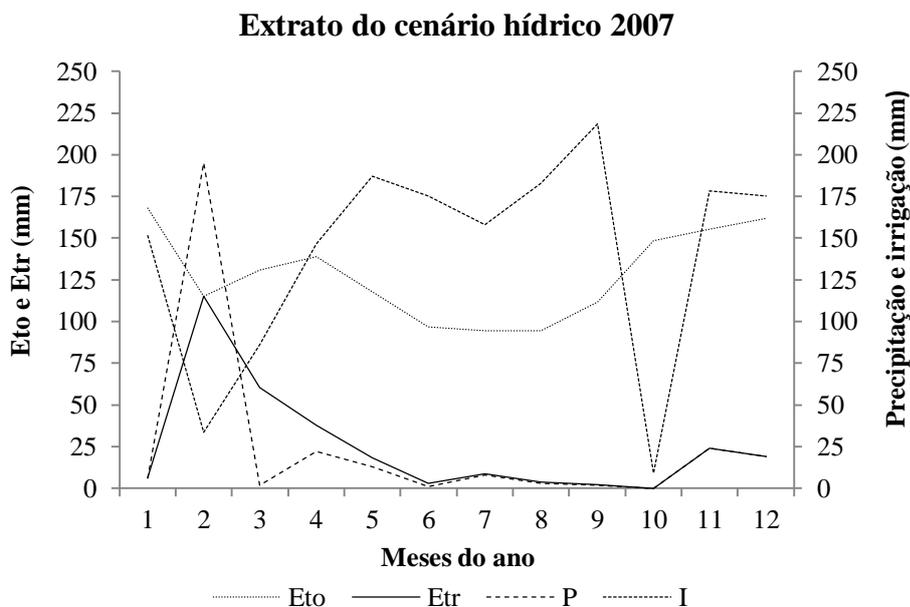


Figura A2: Extrato do cenário hídrico do ano de 2007.

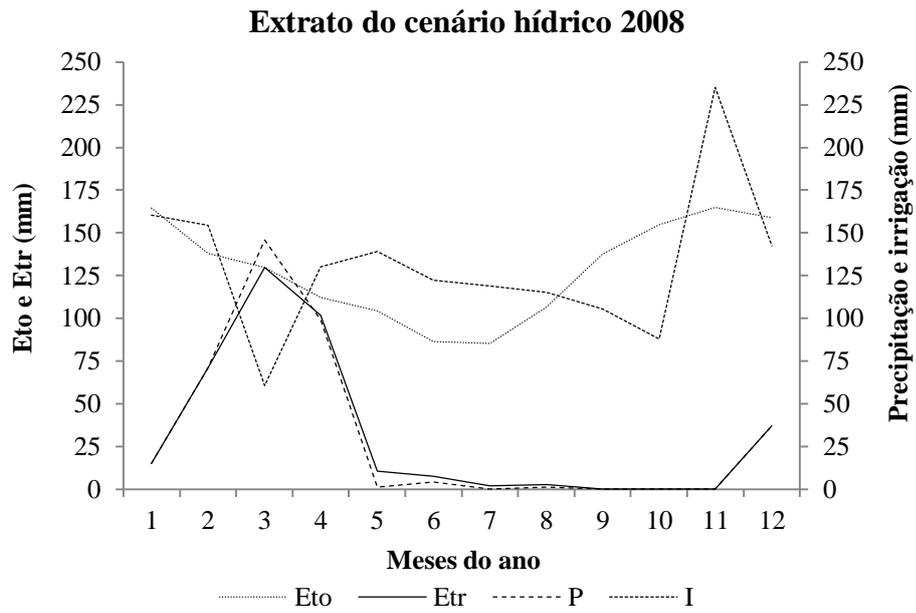


Figura A3: Extrato do cenário hídrico do ano de 2008.

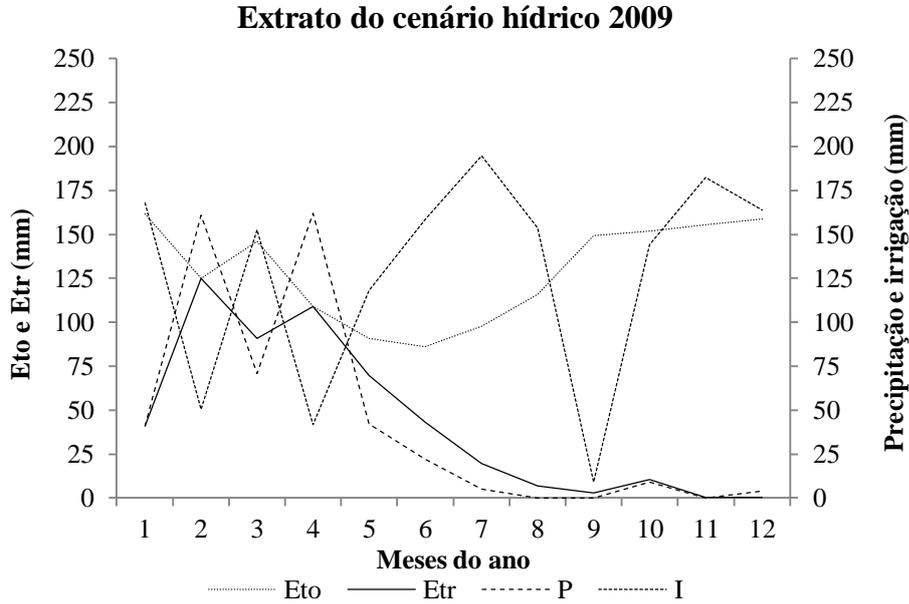


Figura A4: Extrato do cenário hídrico do ano de 2009.

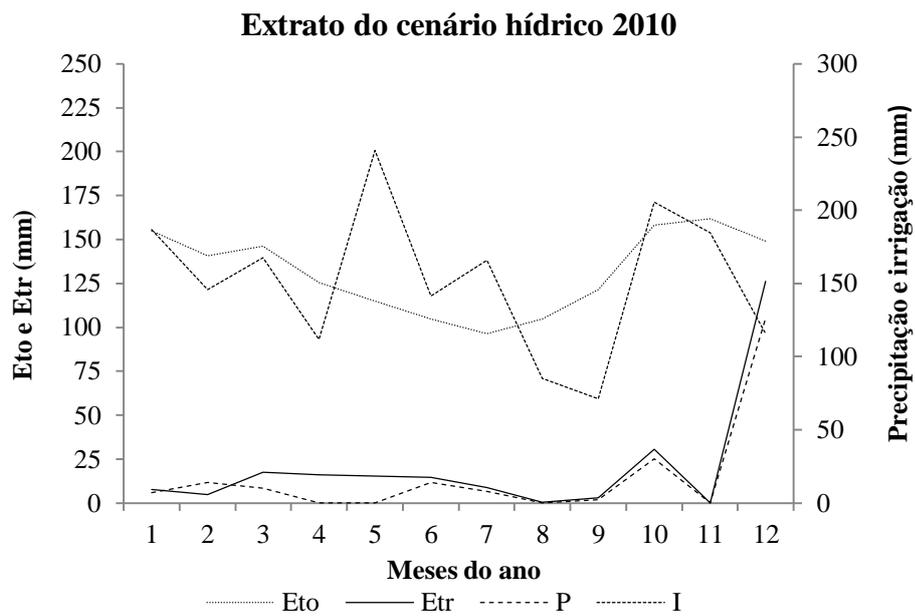


Figura A5: Extrato do cenário hídrico do ano de 2010.

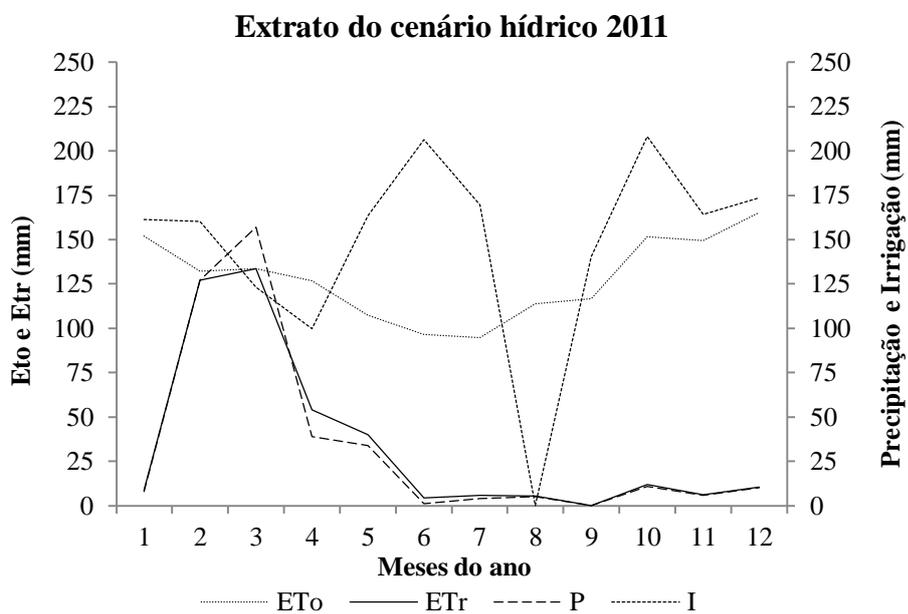


Figura A6: Extrato do cenário hídrico do ano de 2011.

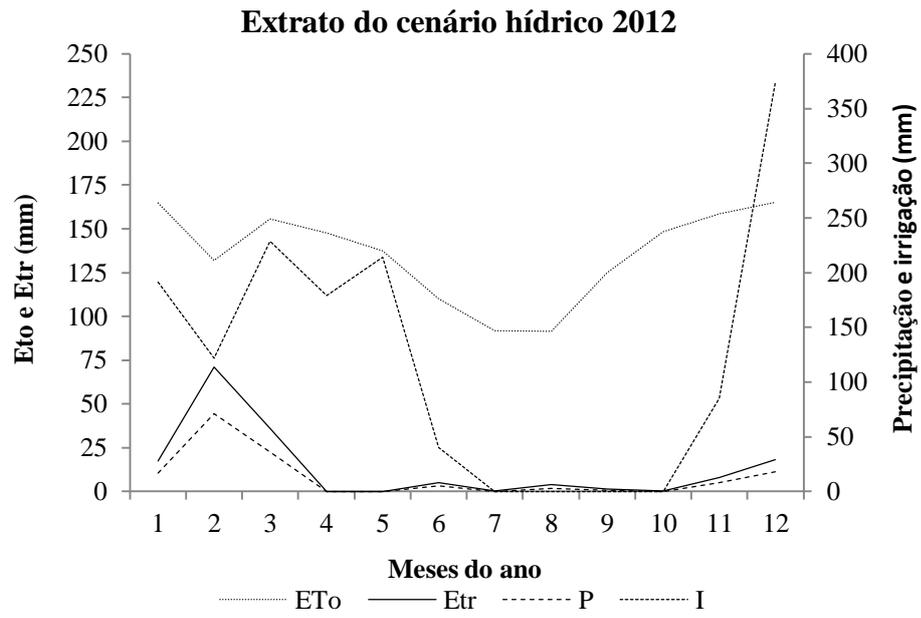


Figura A7: Extrato do cenário hídrico do ano de 2012.

APÊNDICE B – MAPAS DO NDVI PARA O PERÍODO DE CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

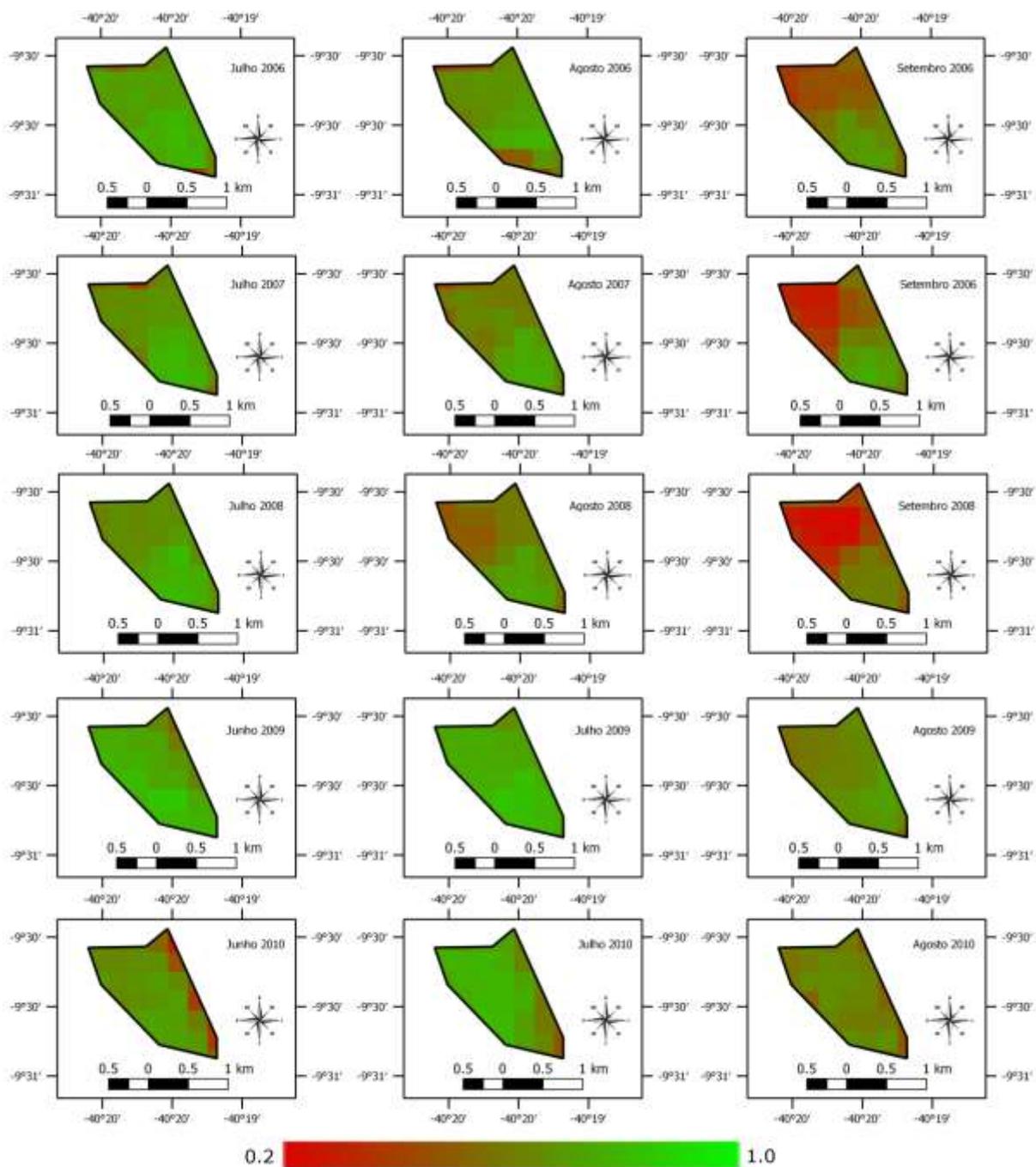


Figura B1: Mapas temáticos do NDVI da área de estudo para os anos-safra de 2005/2006 a 2009/2010.

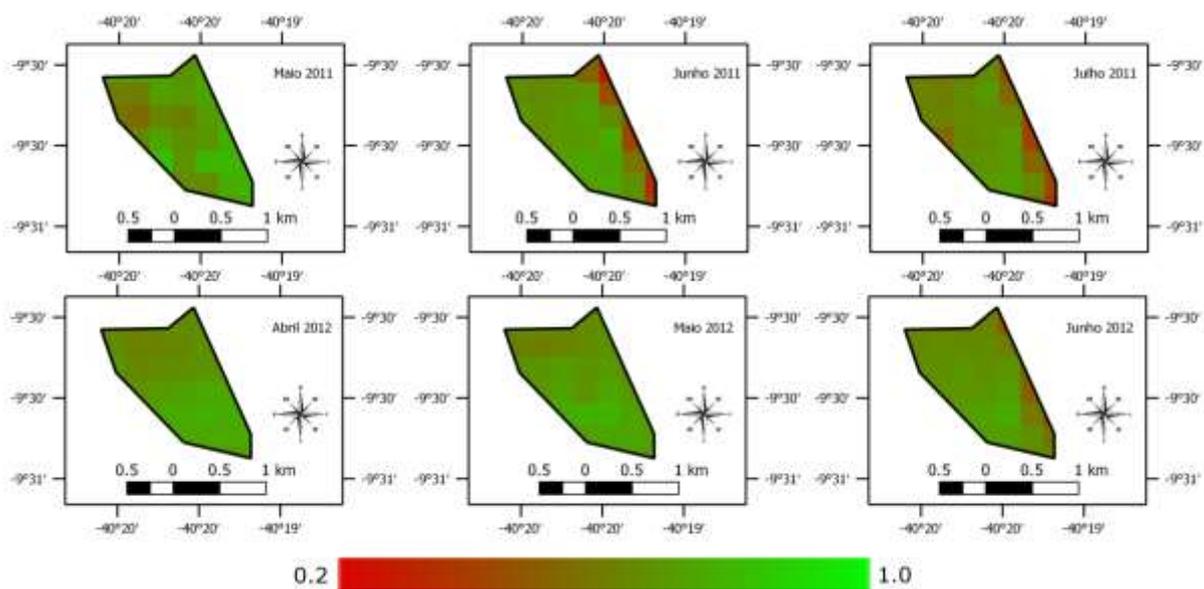


Figura B2: Mapas temáticos do NDVI da área de estudo para os anos-safra de 2010/2011 a 2011/2012.

APÊNDICE C – MAPAS DO NDVI PARA O PERÍODO DE VALIDAÇÃO DOS MODELOS

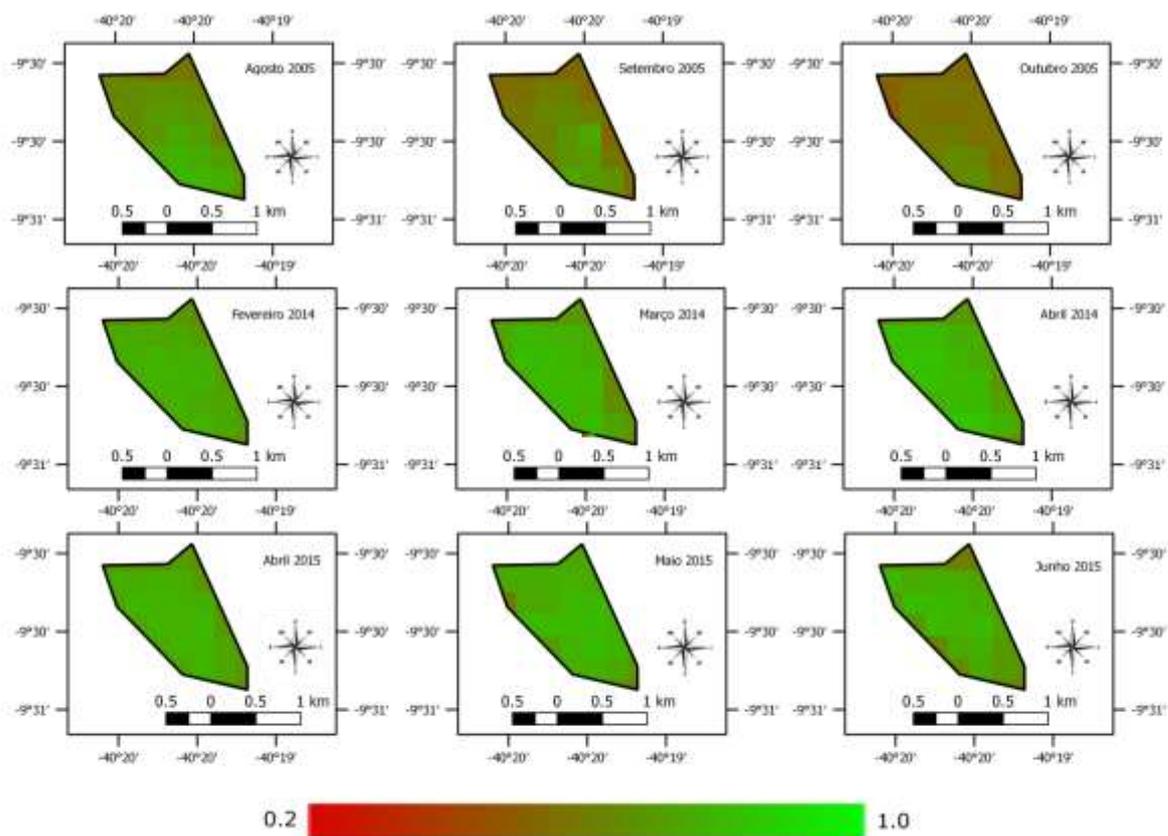


Figura C1: Mapas temáticos do NDVI da área de estudo para os anos-safra de 2004/2005, 2013/2014 e 2014/2015.