

RAMILOS RODRIGUES DE BRITO

**ÍNDICES DE EFICIÊNCIA E PRODUTIVIDADE DA ÁGUA NO DISTRITO DE
IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ**

BOTUCATU - SP

2017

RAMILOS RODRIGUES DE BRITO

**ÍNDICES DE EFICIÊNCIA E PRODUTIVIDADE DA ÁGUA NO DISTRITO DE
IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem)

Orientador: Prof^a. Dr^a. Célia Regina Lopes Zimback

Coorientador: Dr. Aderson Soares de Andrade Júnior

BOTUCATU - SP

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

B862i Brito, Ramilos Rodrigues de, 1989-
Índices de eficiência e produtividade da água no distrito de irrigação dos tabuleiros litorâneos do Piauí / Ramilos Rodrigues de Brito. - Botucatu: [s.n.], 2017
98 p.: il., color., grafs., tabs.

Tese(Doutorado) - Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2017
Orientador: Célia Regina Lopes Zimback
Coorientador: Aderson Soares de Andrade Júnior
Inclui bibliografia

1. Irrigação - Manejo. 2. Sensoriamento Remoto. 3. Água - Uso. I. Zimback, Célia Regina Lopes. II. Andrade Júnior, Aderson Soares de. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

Elaborada por Maria Lúcia Martins Frederico - CRB-8:5255

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: ÍNDICES DE EFICIÊNCIA E PRODUTIVIDADE DA ÁGUA NO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ

AUTOR: RAMILOS RODRIGUES DE BRITO

ORIENTADORA: CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

COORIENTADOR: ADERSON SOARES DE ANDRADE JUNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:



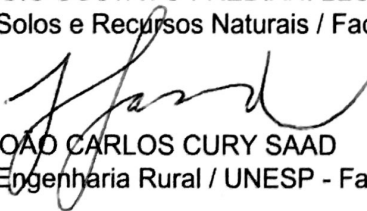
Profa. Dra. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

Depto de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. LUIS GUSTAVO FREDIANI LESSA

Depto de Solos e Recursos Naturais / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof. Dr. JOÃO CARLOS CURY SAAD

Depto de Engenharia Rural / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof. Dr. DIEGO AUGUSTO DE CAMPOS MORAES

Depto de Análise e Desenvolvimento de Sistemas / Faculdade Eduvale de Avaré



Profa. Dra. ANA PAULA BARBOSA GADY

Depto de Biosistemas / ESALQ/USP

Botucatu, 05 de dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Pelo amor, apoio, incentivo, pelos esforços, não medidos, em ajudar-me a alcançar meus objetivos e, serem simplesmente essenciais e insubstituíveis em minha vida, agradeço a Solimar R. Leal, Maria de Fátima A. de B. Leal, Rômulo R. de Brito, Severino R. de Brito, Emanuely A. Alves e Maria da Conceição A. Nunes.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP/FCA), pela oportunidade e suporte para a realização do doutorado.

A minha orientadora Célia Regina Lopes Zimback pela orientação e por acreditar em mim quando eu mesmo não acreditava.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudos.

Ao Centro de Pesquisa Agropecuária do Meio – Norte e ao Pesquisador Doutor Aderson Soares de Andrade Junior pela coorientação e amizade.

Ao Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos de PiauÍ e Cooperativas Bio Fruta, Orgânicos e Parnaíba Litoral pela concessão de informações essenciais para a realização desta pesquisa.

A Francisca Franciana Pereira e Victor Costa Leda pela amizade e disponibilidade em auxiliar-me na execução deste trabalho.

Aos amigos Bruna Favetti, Cícero Manoel, Cristiana Araújo, Donizeti Nicolete, Esteban Conde, Filipe Garcia, Gilson Stanski, Guilherme Pimenta, Jannaylton Santos, João Paulo Pereira, Joáz Dorneles, Juliano Boeck, Júnior de Carli, Maurício Prado, Natália Soares, Rodolfo Rossi, Rodrigo Garcia, Sara Penachio, Tânia Carvalho, Thiago Tassio, Vanessa Polônio, Victor Rocha e Vinícius Carreteiro pela convivência e experiência compartilhada.

RESUMO

A água sempre foi foco de pesquisa entre os recursos naturais, até porque ela é, cada vez mais, um bem insuficiente no planeta. Nos sistemas agrícolas, um dos pontos chave para o sucesso da produção irrigada está no uso racional dos recursos hídricos. Muitos são os métodos, já conhecidos, para se realizar uma boa gestão da água e o sensoriamento remoto mostra-se como uma nova metodologia que relaciona as informações meteorológicas com o vigor da cultura. O estudo tem como hipótese central comprovar o uso das técnicas de sensoriamento remoto na avaliação das práticas de irrigação realizadas no Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí (DITALPI). O interesse científico na pesquisa centrou-se em avaliar o desempenho do DITALPI, por meio da definição de índices de eficiência e produtividade da água de irrigação na cultura da acerola. Procedeu-se a estimativa da Evapotranspiração da Cultura (ET_c) utilizando o índice de vegetação *Modified Soil Adjusted Vegetation Index* – MSAVI₂, por meio da adoção do coeficiente de cultivo modificado ($K_{cMSAVI2}$). Além disso, calculou-se os índices de eficiência, Evapotranspiração Relativa (RET); Coeficiente de Déficit Hídrico (CDW); Índice de Uso Consuntivo (ICUC); Suprimento Relativo da Irrigação (RIS) e de Produtividade da Água (WP). Obteve-se a comprovação do uso do sensoriamento remoto na avaliação do manejo de irrigação realizado pelos produtores. A produtividade média de acerola foi 25 t ha⁻¹ano⁻¹ e a produtividade de água de irrigação foi em média 4 kg m⁻³. Os índices de eficiência evidenciaram o mal aproveitamento do recurso hídrico.

Palavras chave: MSAVI₂. Manejo de Irrigação. Índices de Vegetação. Sensoriamento Remoto.

SUMMARY

Water has been a focus of research among natural resources for long time, because it is increasingly scarce on the planet. The principal focus for the success in agricultural systems of irrigated production is the rational use of water resources. Many methods are known today in conducting good water management and remote sensing is a new methodology that relates meteorological information with the vigor of growth. This thesis has a central hypothesis to prove the good use of remote sensing techniques in the management of irrigation inside the Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí (DITALPI). The scientific interest on this research focused on evaluating the performance of DITALPI per definition of efficiency and productivity indexes of irrigation water in the acerola plantation. Was proceeded Crop Evapotranspiration (ET_c) using Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI2) by the adoption of the modified cultivation coefficient (K_cMSAVI2). In addition, we calculated the efficiency of Relative Evapotranspiration (RET); Crop Water Deficit (CDH); Irrigation Consumptive Use Coefficient (ICUC); Relative Irrigation Supply (RIS) and Water Productivity (WP). The evidence of the use of remote sensing to supply irrigation management was obtained. The average productivity was 25 t ha⁻¹ year⁻¹ and the water productivity of irrigation average 4 kg m⁻³. The efficiency indexes evidenced the poor utilization of the water resource.

Keywords: MSAVI2. Irrigation Management. Vegetation Index. Remote Sensing.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE PARNAÍBA, NO ESTADO DO PIAUÍ, BRASIL E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO (DITALPI) NO MUNICÍPIO DE PARNAÍBA.....	33
FIGURA 2 – FLUXOGRAMA DE PROCESSAMENTO DA FRAÇÃO DE COBERTURA.	37
FIGURA 3 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO (P) MENSAL, PRECIPITAÇÃO EFETIVA (PEF) MENSAL E TEMPERATURA MÉDIA (TMED) DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ PARA 2014.....	43
FIGURA 4 - VARIAÇÃO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO (P) MENSAL, PRECIPITAÇÃO EFETIVA (PEF) MENSAL E TEMPERATURA MÉDIA (TMED) DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ PARA 2015.....	44
FIGURA 5 - VARIAÇÃO TEMPORAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET _o) DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ PARA 2014 E 2015.....	44
FIGURA 6 - VOLUMES MENSIS DE ÁGUA, EM M ³ , APLICADOS A SETE LOTES DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ – DITALPI, EM 2014.....	45
FIGURA 7 - VOLUMES MENSIS DE ÁGUA, EM M ³ , APLICADOS A SETE LOTES DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ – DITALPI, EM 2015.....	46
FIGURA 8 - PRODUÇÃO MENSAL DE ACEROLA, EM KG, DE SETE LOTES DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ – DITALPI, EM 2014.....	47
FIGURA 9 - PRODUÇÃO MENSAL DE ACEROLA, EM KG, DE SETE LOTES DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ – DITALPI, EM 2015.....	47
FIGURA 10 – MSAVI ₂ MENSAL CORRESPONDENTE AO LOTE LP.04.D.19 DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ, PARA OS ANOS DE 2014 E 2015.....	50
FIGURA 11 - MSAVI ₂ MENSAL CORRESPONDENTE AO LOTE LP.04.E.25 DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ, PARA OS ANOS DE 2014 E 2015.....	53
FIGURA 12 - MSAVI ₂ MENSAL CORRESPONDENTE AO LOTE LP.08.50 DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ, PARA OS ANOS DE 2014 E 2015.....	57
FIGURA 13 - MSAVI ₂ MENSAL CORRESPONDENTE AO LOTE LP.03.D.05 DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ, PARA OS ANOS DE 2014 E 2015.....	60
FIGURA 14 - MSAVI ₂ MENSAL CORRESPONDENTE AO LOTE LP.08.67 DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ, PARA OS ANOS DE 2014 E 2015.....	64
FIGURA 15 - MSAVI ₂ MENSAL CORRESPONDENTE AO LOTE LP.04.D.24 DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ, PARA OS ANOS DE 2014 E 2015.....	67
FIGURA 16 - MSAVI ₂ MENSAL CORRESPONDENTE AO LOTE LP.04.E.26/27 DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ, PARA OS ANOS DE 2014 E 2015.....	70
FIGURA 17 - VALORES MÉDIOS DE K _{CMSAVI2} CALCULADOS POR SENSORIAMENTO REMOTO PARA 2014, REFERENCIADOS A SETE LOTES DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ - DITALPI.....	74

FIGURA 18 - VALORES MÉDIOS DE $K_{C_{MSAVI2}}$ CALCULADOS POR SENSORIAMENTO REMOTO PARA 2015, REFERENCIADOS A SETE LOTES DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ - DITALPI	74
FIGURA 19 – ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO, EM MM, DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ, CORRESPONDENDO AO LOTE LP.04.D.19 NAS CONDIÇÕES REAIS DE IRRIGAÇÃO, PARA OS ANOS DE 2014 (A) E 2015 (B) E SIMULAÇÕES SOB IRRIGAÇÃO PLENA PARA 2014 (C) E 2015 (D)	78
FIGURA 20 - ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO, EM MM, DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ, CORRESPONDENDO AO LOTE LP.04.E.25 NAS CONDIÇÕES REAIS DE IRRIGAÇÃO, PARA OS ANOS DE 2014 (A) E 2015 (B) E SIMULAÇÕES SOB IRRIGAÇÃO PLENA PARA 2014 (C) E 2015 (D)	79
FIGURA 21 - ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO, EM MM, DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ, CORRESPONDENDO AO LOTE LP.08.50 NAS CONDIÇÕES NORMAIS DE MANEJO, PARA OS ANOS DE 2014 (A) E 2015 (B) E SIMULAÇÕES SOB IRRIGAÇÃO PLENA PARA 2014 (C) E 2015 (D)	80
FIGURA 22 - ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO, EM MM, DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ, CORRESPONDENDO AO LOTE LP.03.D.05 NAS CONDIÇÕES REAIS DE IRRIGAÇÃO, PARA OS ANOS DE 2014 (A) E 2015 (B) E SIMULAÇÕES SOB IRRIGAÇÃO PLENA PARA 2014 (C) E 2015 (D)	81
FIGURA 23 - ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO, EM MM, DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ, CORRESPONDENDO AO LOTE LP.08.67 NAS CONDIÇÕES REAIS DE IRRIGAÇÃO, PARA OS ANOS DE 2014 (A) E 2015 (B) E SIMULAÇÕES SOB IRRIGAÇÃO PLENA PARA 2014 (C) E 2015 (D)	82
FIGURA 24 - ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO, EM MM, DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ, CORRESPONDENDO AO LOTE LP.04.D.24 NAS CONDIÇÕES REAIS DE IRRIGAÇÃO, PARA OS ANOS DE 2014 (A) E 2015 (B) E SIMULAÇÕES SOB IRRIGAÇÃO PLENA PARA 2014 (C) E 2015 (D)	83
FIGURA 25 – ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO, EM MM, DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ, CORRESPONDENDO AO LOTE LP.04.E.26/27 NAS CONDIÇÕES REAIS DE IRRIGAÇÃO, PARA OS ANOS DE 2014 (A) E 2015 (B) E SIMULAÇÕES SOB IRRIGAÇÃO PLENA PARA 2014 (C) E 2015 (D)	84
FIGURA 26 - ÍNDICE DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO RELATIVA (RET) DO DITALPI, NAS CONDIÇÕES REAIS DE IRRIGAÇÃO, PARA 2014 E 2015.....	86
FIGURA 27 - COEFICIENTE DE DEFICIÊNCIA HÍDRICA (CDW) DO DITALPI, NAS CONDIÇÕES NORMAIS DE MANEJO, PARA 2014 E 2015	86
FIGURA 28 - ÍNDICE DE USO CONSUNTIVO DA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO (ICUC) DO DITALPI, NAS CONDIÇÕES NORMAIS DE MANEJO, PARA 2014 E 2015	87
FIGURA 29 - ÍNDICE DE SUPRIMENTO RELATIVO DE IRRIGAÇÃO (RIS) DO DITALPI, NAS CONDIÇÕES NORMAIS DE MANEJO, PARA 2014 E 2015	88
FIGURA 30 - ÍNDICE DE PRODUTIVIDADE DA ÁGUA (WP) DO DITALPI, NAS CONDIÇÕES NORMAIS DE MANEJO, PARA 2014 E 2015.....	89

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DAS BANDAS 4 (VERMELHO) E 5 (INFRATERMELHO) DO SENSOR OLI - SATÉLITE LANDSAT 8	35
TABELA 2 - PARÂMETROS DE ENTRADA PARA O MÓDULO CROP NO PROGRAMA CROPWAT 8.0, COM INFORMAÇÕES DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ - DITALPI.....	40
TABELA 3 - PARÂMETROS DE ENTRADA PARA O MÓDULO SOIL NO PROGRAMA CROPWAT 8.0, COM INFORMAÇÕES DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ - DITALPI.	40
TABELA 4 - VALORES DE ÁREA ÚTIL, SOLO DESCOBERTO, ÁREA TOTAL E FRAÇÃO DE COBERTURA CALCULADOS POR SENSORIAMENTO REMOTO, CORRESPONDENTE A SETE LOTES DO DISTRITO DE IRRIGAÇÃO DOS TABULEIROS LITORÂNEOS DO PIAUÍ - DITALPI.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
AT	Área Total
AU	Área Útil
CAD	Capacidade de Água Disponível
CC	Capacidade de Campo
CDW	Coefficiente de Deficiência Hídrica
DEC	Decendial
DITALPI	Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
DVI	Difference Vegetation Index
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ET _c	Evapotranspiração da Cultura
ET _o	Evapotranspiração de Referência
EUA	Eficiência do uso da água
EVI	Enhanced Vegetation Index
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
F _c	Fração de cobertura do solo
ICUC	Índice de Uso Consuntivo da Água
IV	Índices de Vegetação
K _c	Coefficiente de Cultura
K _y	
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
MATOPIBA	Região que compreende o bioma Cerrado dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia.
METRIC	Mapping EvapoTranspiration at high Resolution with Internalized Calibration
MSAVI ₂	Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2
ND	Número Digital
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index

NIR	Banda Infravermelho
NRVI	Normalized Ratio Vegetation Index
OLI	Operational Land Imager
P	Precipitação
PEF	Precipitação Efetiva
PVI	Perpendicular Vegetation Index
RED	Banda Vermelho
REM	Radiação Eletromagnética
RET	Evapotranspiração Relativa
RIS	Índice de Suprimento Relativo
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SD	Solo descoberto
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SR	Sensoriamento Remoto
TMED	Temperatura Média
TSAVI	Transformed Soil Adjusted Vegetation Index
USGS	United States Geological Survey
WDVI	Weighted Difference Vegetation Index
WP	Produtividade da água evapotranspirada pela cultura

Sumário

	Páginas
1	INTRODUÇÃO.....21
2	REVISÃO DE LITERATURA23
2.1	Cultura da acerola23
2.2	Agricultura irrigada.....24
2.2.1	Evapotranspiração.....25
2.2.2	Produtividade da água - WP26
2.3	Geoprocessamento27
2.3.1	Sensoriamento remoto28
2.3.2	Índice de vegetação – IV30
3	MATERIAL E MÉTODOS33
3.1	Materiais33
3.1.1	Área de estudo33
3.1.2	Plano de cultivo e volumes de água aplicados às parcelas.....34
3.1.3	Imagens de satélite utilizadas.....34
3.1.4	Programas utilizados35
3.2	Métodos.....35
3.2.1	Calibração radiométrica.....35
3.2.2	Estimativa do índice de vegetação36
3.2.3	Fração de Cobertura.....36
3.2.4	Coeficiente de cultura ajustado por sensoriamento remoto.....38
3.2.5	Balanço Hídrico – CROPWAT39
3.2.5.1	Entrada de dados das variáveis meteorológicas39
3.2.5.2	Entrada de dados das variáveis da cultura.....39
3.2.5.3	Entrada de dados das variáveis do solo.....40
3.2.5.4	Saída de dados da necessidade hídrica da cultura41
3.2.6	Índices de eficiência e produtividade da água.....41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO43
4.1	Configuração climática43
4.2	Volume de água aplicado e produção de acerola do DITALPI45
4.3	Fração de Cobertura (Fc)48
4.4	Índice de vegetação MSAVI ₂49
4.5	Coeficiente da Cultura por Sensoriamento Remoto.....73
4.6	Balanço Hídrico da Cultura75

4.7	Índices de Eficiência e Produtividade de Água	85
4.7.1	Evapotranspiração Relativa (RET).....	85
4.7.2	Coeficiente de Deficiência Hídrica (CDW)	86
4.7.3	Uso Consuntivo da Água de Irrigação (ICUC).....	87
4.7.4	Suprimento Relativo de Irrigação (RIS).....	88
4.7.5	Produtividade de água (WP)	89
5	CONCLUSÃO	91
6	REFERÊNCIAS.....	92

1 INTRODUÇÃO

A região Nordeste do Brasil é caracterizada por precipitações irregulares e insuficientes, elevados valores de evapotranspiração e altas temperaturas. Isto sugere que é importante adotar práticas de irrigação nos cultivos e, além disso, é prioritário estabelecer critérios de manejo de irrigação. Desta maneira, cria-se independência sobre os efeitos meteorológicos, uso racional dos recursos hídricos e mantêm-se a propriedade lucrativa quando em condições climáticas adversas.

Nestas condições encontra-se o Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí (DITALPI), com área irrigável de 8.007 ha, dos quais se encontram em operação, aproximadamente, 1.000 ha. A maior parte dos irrigantes trabalham com fruticultura, destacando-se as culturas de acerola, coco, goiaba, cajueiro anão e melancia.

A água utilizada no DITALPI provém do Rio Parnaíba, que abastece o projeto durante todo o ano. Os métodos de irrigação predominantes, são o gotejamento e a microaspersão. De acordo com Bos et al. (2005), a performance dos distritos de irrigação é medida por diversos índices de eficiência e de produtividade da água. Entretanto, para que essa mensuração seja executada com melhor exatidão, é necessário a informação da quantidade de água efetivamente aplicada na cultura, com o propósito de permitir a estimativa do balanço hídrico do cultivo, bem como para avaliar o manejo da irrigação empregado na área.

O manejo da irrigação abrange alguns objetivos básicos, como: manter ou melhorar as condições químicas e físicas do solo; aumentar a eficiência dos fertilizantes; melhorar a qualidade do produto; maximizar a produtividade da cultura e diminuir os custos de água e energia.

Existem muitas formas de realizar o manejo da irrigação, quer seja via solo, planta ou via clima. Todas essas formas citadas envolvem custos e, além disso, há métodos que são recomendados apenas para fins de pesquisa, devido alta a tecnologia e conhecimento técnico empregado. Entretanto, utilizar as informações climáticas para realizar o manejo da irrigação, por meio do cômputo da Evapotranspiração de Referência (ET_o), ainda é a opção mais comum e acessível. A ET_o pode ser calculada de forma direta e indireta, porém os valores determinados são pontuais e, a precisão diminui quando estes conceitos são aplicados em grandes áreas, como distritos irrigados.

Então, uma forma de espacializar a estimativa da evapotranspiração é utilizando o Sensoriamento Remoto (SR). O Sensoriamento Remoto (SR) aplicado à agricultura apresenta grande potencial, pois por meio de suas técnicas é possível obter informações sobre: estimativa da biomassa e produtividade da cultura, vigor vegetativo, índice de área foliar, estimativa da evapotranspiração, entre outros. A maioria dos estudos de ETo com base em SR usam um modelo de balanço de energia onde a temperatura da superfície da cultura está incluída como uma variável medida. Outra abordagem baseia-se na associação dos Índices de Vegetação (IV) com o método de Penman-Monteith, regulamentado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), para calcular a Evapotranspiração de Referência (ETo). Esta relação, ETo-IV, é mais simples que a abordagem baseada no balanço energético, uma vez que precisa de menos medições e baseia-se em princípios de comprimento de onda.

Desta forma, o estudo tem como hipótese central aplicar as técnicas de sensoriamento para avaliar a eficácia da irrigação no DITALPI. O interesse científico na pesquisa centrou-se em analisar o desempenho de sete lotes do DITALPI, utilizando os índices de eficiência e produtividade da água de irrigação na cultura da acerola.

Como objetivos específicos, tem-se:

- a) Estimativa da Fração de cobertura para a cultura da acerola;
- b) Estimativa do KcMSAVI₂ da Aceroleira utilizado no DITALPI;
- c) Obtenção dos índices de eficiência de irrigação: RET, CDW, ICUC e RIS;
- d) Obtenção da Produtividade da água de irrigação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cultura da acerola

A acerola (*Malpighia emarginata* DC) ou cereja-das-antilhas é originária da América Tropical, onde é conhecida em estado nativo ou cultivada (ALVES; MENEZES, 1995). A sua difusão ocorreu pelos nativos das ilhas Antilhanas, pois a utilizavam muito em sua alimentação e disseminavam as sementes em suas viagens e migrações (ALVES, 1992).

Pelo grande potencial como fonte natural de vitamina C e sua grande capacidade de aproveitamento industrial, a acerola têm atraído o interesse dos fruticultores e passou a ter importância econômica em várias regiões do mundo (NOGUEIRA et al., 2002). No mercado interno, a acerola é comercializada, principalmente, na forma de polpa congelada e fruto *in natura*. Outros produtos de acerola que podem ser encontrados no mercado interno são: sucos em embalagens longa vida, acerola em pó, acerola com vitamina E, cápsulas medicinais de vitamina C pura, geleias e doces (MANICA et al., 2003).

A introdução da acerola no Brasil ocorreu por volta de 1950, mas apenas na década de 80, após a revelação de ser rica em vitamina C é que seu cultivo se espalhou rapidamente (NONINO, 1977). Além disso, o Brasil é considerado o maior produtor, consumidor e exportador de acerola no mundo (CARVALHO, 2000).

Segundo Junqueira et al. (2004), o Brasil apresenta condições ótimas para a produção da acerola. Aliado a isso, uma vantagem do cultivo dessa planta é o elevado número de safras por ano, geralmente 4 safras por ano em cultivo de sequeiro e, podendo chegar a 7 safras em cultivos irrigados. Existem plantios comerciais em praticamente todos os Estados brasileiros (ALVES, 1996), no entanto, é no Nordeste onde a aceroleira melhor se adapta (PAIVA et al., 1999).

Com relação ao fator água, Teixeira e Azevedo (1994) explicaram que a planta de acerola é bastante resistente à seca, suportando períodos com acentuadas deficiências hídricas, ainda assim, quando atendida as necessidades hídricas, que variam de 1.200 mm a 2.000 mm, apresentam uma boa produção. A possibilidade do uso da irrigação em períodos secos é considerada vantajosa, já que a presença de umidade no solo associada à temperatura elevada evita que a planta entre em

repouso, vegetando, florescendo normalmente e ampliando o período produtivo (MANICA et al., 2003).

A atividade frutícola brasileira ocupa uma posição de destaque em 14 centros de irrigação do Nordeste, as condições locais possibilitam a produção de frutas durante quase todo o ano, até mesmo no período em que os mercados europeu, asiático e norte-americano estão desabastecidos. Isso configura o Brasil como o maior produtor, consumidor e exportador mundial de acerola. A produtividade da aceroleira pode variar em função da variedade, condições ambientais e do manejo empregado. Área sem irrigação em Petrolina, PE a produtividade é de 17 kg de frutos/planta, com irrigação a produtividade eleva para 100 kg de frutos planta⁻¹ ano⁻¹. Entre os principais estados brasileiros produtores de acerola, Pernambuco representa 23,11% da produção nacional; seguido pelo Ceará, com 14,32%; São Paulo, com 11,39%; e Bahia, com 10,48%. A acerola também é produzida nos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba e Piauí. (CALGARO e BRAGA, 2012).

2.2 Agricultura irrigada

A água é um dos insumos mais importantes para os processos vitais dos animais e vegetais. No caso das plantas, uma importância particular é conferida à água, pois o protoplasma das plantas alcança pelo menos 95% ou mais de seu peso total, e atua na fotossíntese e na fosforilação oxidativa (BRITO, 2014).

O consumo de água pelas plantas está relacionado à sazonalidade e aleatoriedade dos elementos de clima. Por isso, no manejo da irrigação, torna-se fundamental conhecer as relações solo – água – planta – atmosfera, a fim de estimar a quantidade de água necessária a ser fornecida para a cultura.

É cada vez mais evidente que toda o alimento necessário à população do planeta não será suficiente para suprir as necessidades sem a utilização de técnicas sob o comando de sistemas de irrigação e drenagem (BRASIL, 2006).

O Nordeste é a região do Brasil que apresenta períodos de déficit hídrico mais prolongados para as plantas, pois mesmo com alta intensidade pluviométrica, a sua distribuição é irregular. Dessa forma, a irrigação é uma tecnologia vital para a agricultura, que é a principal atividade econômica, absorvendo de mão-de-obra e fixando o homem no campo.

É importante destacar que segundo o relatório feito pela Embrapa em colaboração com a Agência Nacional de Águas - ANA (BRASIL, 2016), o Brasil classifica-se entre os dez países com maior área irrigada no mundo, ainda tem potencial para quintuplicar a área agricultável utilizando a irrigação. Tendo crescido o número de pivôs centrais em 43% de 2006 a 2014, tem-se Minas Gerais, Goiás, Bahia e São Paulo como os estados que concentram 80% da área irrigada no Brasil.

O aprimoramento das informações referentes ao uso da água na agricultura, auxilia os gestores públicos a tomar decisões mais efetivas a respeito do uso racional da água, afim de promover o aumento da eficiência e consequentemente reduzir o desperdício.

2.2.1 Evapotranspiração

A combinação de dois processos separados, sendo a água “perdida” por evaporação do solo e, a água consumida na transpiração é chamada de evapotranspiração (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração é o indicador indispensável para programar o manejo da irrigação. O conhecimento da demanda de evapotranspiração e precipitação pluviométrica é que indicam o requerimento de água pelas culturas para o irrigante.

A evapotranspiração não é um fenômeno que ocorre ocasionalmente, ela é influenciada por vários componentes e sistemas como elementos edáficos, biológicos, fatores de clima e as particularidades da cultura, bem como o manejo cultural adotado pelo produtor (COUTO; SANS, 2002).

Os teores de evaporação e evapotranspiração se elevam, principalmente, com a maior quantidade de radiação incidente, maior temperatura do ar, maior velocidade do vento e menor umidade relativa do ar (DOORENBOS; PRUITT, 1977). Para tentar se ajustar, as plantas administram a taxa evapotranspirométrica, conforme a quantidade de água é absorvida pelas raízes torna-se menor que a taxa de transpiração, controlando o fechamento estomático que detecta menores teores de água no tecido foliar.

A ETo foi definida como a evapotranspiração de uma cultura hipotética que ocupa toda a superfície do solo, em crescimento ativo, sem restrições hídricas ou nutricionais, com altura média de 12 cm, albedo de 0,23 e resistência da superfície de

70 s m⁻¹. A partir dessa definição de ETo adotou-se a equação de Penman-Monteith como o método padrão para estimativa da ETo (ALLEN et al., 1998).

As metodologias utilizadas na determinação da ETo podem ser diretas e indiretas. Entre os métodos diretos considera-se a lisimetria de pesagem, nível de lençol freático e drenagem. Já entre os métodos indiretos estão os evaporímetros e as equações de estimativas baseadas em dados experimentais (BERNARDO et al., 2006). A seleção dos métodos está sujeita ao nível de rigorosidade requerido e dos recursos financeiros para a compra de instrumentos. Por isso, esses métodos são restritos, pois eles estimam medidas de ET para uma região determinada e não em escala regional, entretanto, estes métodos não perdem sua confiabilidade. Por essa limitação de custo e de escala, desenvolveu-se técnicas de SR para a estimativa da ET em amplas extensões de terra.

2.2.2 Produtividade da água - WP

Há uma grande preocupação mundial com a redução da disponibilidade dos recursos hídricos e o seu elevado custo na produção agrícola tem proporcionado diversos estudos científicos com foco na Produtividade da Água (WP) de irrigação pelas plantas, uma vez que este insumo participa de grande parte dos custos de produção.

A WP, também conhecida como Eficiência do Uso da Água (EUA), é um assunto importante na agricultura de regiões semiáridas, por causa das áreas de agricultura crescente e, em contrapartida, as necessidades elevadas de água para as culturas. Conseqüentemente, a otimização do uso da água para as culturas é um desafio para garantir a sustentabilidade da agricultura em áreas semiáridas.

A WP relaciona a produção de biomassa da cultura, pela quantidade de água aplicada ou evapotranspirada. Na agricultura irrigada, o aumento dos níveis da EUA são complexos e demandam percepções interdisciplinares (SOUSA et al., 2000).

Aumentar a WP é fundamental para reduzir o gasto de água pelos atuais modelos de produção da agricultura irrigada. Isso é possível realizando mudanças na eficiência dos sistemas de irrigação, no manejo da irrigação e das práticas culturais. A eficiência dos sistemas de irrigação envolve a eficácia em conduzir a água da fonte hídrica até a cultura, bem como na aplicação dela (DONATO et al., 2013).

A WP pode ser explicada de duas maneiras: WP da folha, sendo a razão entre ganho de carbono unitário fixado pela fotossíntese por unidade de água transpirada; e WP da planta, corresponde à razão entre massa seca produzida e lâmina de água transpirada. Economicamente, considera-se a razão entre produção, em kg, por unidade de água transpirada, em m³ (DONATO et al., 2013).

Segundo Zhengbin et al. (2011), plantas com bons desempenhos fisiológicos pressupõem plantas com maiores valores de relação raiz/parte aérea, conteúdo de clorofila, eficiência fotossintética e acúmulo de massa seca, com menor volume de água aplicada. As melhorias das funções fisiológicas envolvem ajustamento osmótico, regulação estomatal, relação fotossíntese/transpiração, maturação, manutenção da estabilidade da membrana plasmática e das enzimas antioxidantes ativas.

Há modelos que estimam a produção da cultura em função da água por ela utilizada, fato que tem despertado interesse na ciência pela eficácia que pode desempenhar na otimização de recursos hídricos, sendo útil quando se planeja realizar a gestão da irrigação em condições de déficit hídrico.

2.3 Geoprocessamento

O armazenamento, a representação e a análise de informações espaciais em meio digital definiram a origem do Geoprocessamento. O termo Geoprocessamento tem seu conceito modificado por diversos autores. Alguns definem como um conjunto de tecnologias, outros como disciplina do conhecimento, há circunstâncias que o tratam como sinônimo de Sistemas de Informação Geográfica e Geotecnologias (LEITE, 2013).

O Geoprocessamento é designado a processar os dados georreferenciados, desde a coleta até as exportações em mapas, relatórios e arquivos digitais, fornecendo soluções para seu armazenamento, gerenciamento, manipulação e análise (DAINESE, 2001). Este conjunto possui como principal ferramenta o Sistema de Informação Geográfica - SIG.

A evolução da tecnologia de geoprocessamento está associada às fases da evolução humana em busca da representação real do planeta terra. Vários órgãos de pesquisa se interessaram pelo assunto e colaboraram com o crescimento da comunidade de geoprocessamento. Porém, foi na década de 90 que a tecnologia do

geoprocessamento se espalhou e se instituiu definitivamente, em função dos avanços da computação.

O termo Sistema de Informação Geográfica é confundido com o termo geoprocessamento. Porém, o geoprocessamento faz referência a qualquer tipo de processamento de dados georreferenciados, enquanto que SIG processa e armazena dados gráficos e não gráficos (alfanuméricos) com ênfase em análises espaciais e modelagens de superfícies.

As técnicas de geoprocessamento ajudam na distinção de problemáticas ambientais. Diante da necessidade de cuidar dos recursos hídricos, surgiu a demanda por informações a respeito de seus comportamentos no decorrer do tempo, bem como as consequências mediante ações antrópicas, as quais são as que mais destroem a natureza (LEÃO et al., 2004).

2.3.1 Sensoriamento remoto

O Sensoriamento Remoto (SR) foi embasado nos princípios das câmaras fotográficas aéreas para se obter fotos da superfície terrestre (MENESES, 2012). De acordo com Ponzoni e Shimabukuro (2007), o SR é uma técnica empregada para identificar e quantificar o arranjo de alvos em local definido, utilizando sensores a bordo de aeronaves e espaçonaves, com a finalidade central de estudar a Terra, por meio da análise de interações da Radiação Eletromagnética (REM) e dos elementos encontrados na superfície da Terra em suas mais distintas abordagens.

A explicação do que se trata a REM inicia com a compreensão da dualidade de comportamento em onda e energia. Então, a REM que se propaga pelo espaço, como a luz solar, é, ao mesmo tempo, uma forma de onda e de energia (MENESES, 2012).

O comportamento espectral dos alvos, conhecido como assinatura espectral, está relacionado à interação entre as feições terrestres com a REM. Este artifício depende de como estão estruturados os átomos e as moléculas de cada alvo. Os elétrons dos materiais estão arranjados em distintos níveis energéticos, em torno dos núcleos atômicos. Estes níveis eletrônicos podem absorver maior ou menor quantidade da REM (FIGUEIREDO, 2005).

A assinatura espectral é a intensidade que um alvo reflete ou emite a REM incidente sobre ela nos diferentes comprimentos de onda do espectro

eletromagnético. Os alvos são quaisquer objetos de estudo, como uma folha, tipo de solo, pavimentação, entre outros.

Moreira (2001) resumiu o sensoriamento remoto como, um conjunto de atividades necessárias para a aquisição de informações a respeito dos recursos naturais, renováveis e não renováveis, por meio da utilização de dispositivos sensores colocados em aviões, satélites e até mesmo na superfície da Terra.

A importância e a intensificação do emprego das técnicas de SR, em diferentes áreas do conhecimento, especialmente na área ambiental, é devido à sua capacidade de permitir a coleta de dados espectrais em diferentes períodos do ano, proporcionando a oportunidade de analisar os múltiplos fenômenos através do tempo (VALENTE, 2001).

O SR possibilita aplicações em inúmeras áreas: agricultura, meio ambiente, geologia, recursos hídricos, estudo de solos, florestas (FIGUEIREDO, 2005). Como exemplo de aplicações do SR na agricultura, tem-se: previsão de safras, mapeamento de culturas, zoneamento agrícola e agroecológico, dimensionamento das áreas de plantio e estimativa do rendimento, monitoramento de incêndios em lavouras e pastagens (FIGUEIREDO, 2005).

A produção em larga escala no campo agrícola tornou-se uma tarefa que demanda mão de obra especializada e agrega profissionais de áreas distintas. O uso do SR tem se mostrado uma ferramenta eficaz para monitoramento da produção e planejamento de atividades de manejo.

Jaafar e Ahmad (2015) elaboraram a previsão da produção de culturas a partir de índices de vegetação em terras áridas e semiáridas. Os resultados deste estudo são cruciais para se obter estimativas precisas da produtividade da agricultura irrigada e para estudar o efeito do armazenamento de carbono do ecossistema.

Com relação ao SR aplicado a previsão de safras, segundo Formaggio (2004), as mercadorias agrícolas negociadas nas bolsas de valores de todo o mundo, como o café, a soja, o cacau, o milho, o trigo, o suco de laranja, o açúcar e o álcool, movimentam cifras em bilhões de dólares. O fator que determina as oscilações das bolsas que trabalham com mercado futuro, são as probabilidades de oferta e demanda dos produtos. A empresa que conseguir prever com maior antecedência e precisão a sua safra e as dos seus concorrentes poderá influir no preço de uma mercadoria estratégica e fazer os melhores acordos.

Muitas pesquisas abordaram o uso do SR no auxílio da produção agrícola. Moreira et al. (2003) utilizaram imagens de satélite e desenvolveram uma metodologia que permitiu mapear as áreas em que o café-produção não confundiu espectralmente com as classes mata e pastagem, em nenhuma data de passagem do satélite, que foram analisadas em Minas Gerais e São Paulo.

Esquerdo et al. (2015) mapearam a prática da agricultura anual na região do MATOPIBA com técnicas de sensoriamento remoto, nos anos de 2005, 2010 e 2014, e estimaram as taxas de expansão desta atividade nos diferentes períodos. Os resultados evidenciaram um intenso processo de expansão da agricultura anual no MATOPIBA e o estabelecimento da região como um polo de produção de grãos.

Utilizando vários produtos do geoprocessamento, Quartezani (2012) estimou a variável produção de café conilon no município de São Mateus – ES, e para isso, ele abordou fundamentos em SIG, comportamento espectral e índice de vegetação, variogramas, krigagem, simulação estocástica.

Na engenharia rural o SR também tem grande importância, principalmente no tocante as técnicas do manejo na irrigação. Folhes et al. (2009) realizaram um estudo que discutiu o uso potencial do modelo METRIC, concluíram como um método alternativo para calcular o consumo de água na agricultura irrigada e as implicações para a gestão dos recursos hídricos em perímetros irrigados no Nordeste do Brasil.

Nesse amplo contexto, fica evidente a importância do SR, pois as mais robustas, rápidas e econômicas formas de se efetuarem previsões de safras, apoiam-se em dados obtidos remotamente por sensores orbitais.

2.3.2 Índice de vegetação – IV

Os Índices de Vegetação (IV) são funções matemáticas desenvolvidas para avaliar a cobertura vegetal e correlacionam a assinatura espectral do alvo e os parâmetros mensuráveis no campo, tanto quantitativamente, quanto qualitativamente (BARBOSA, 2006).

A combinação da reflectância de objetos da superfície em dois ou mais comprimentos de onda é chamada de índice de vegetação, cuja finalidade é destacar uma propriedade particular da vegetação (JENSEN, 2009).

Os índices de vegetação são relacionados a critérios biofísicos da cobertura vegetal, como biomassa e índice de área foliar (PONZONI et al. 2012). A formulação

destes índices combina a luz refletida nas ondas do vermelho e infravermelho, proporcionando assim uma medida indireta da absorção de luz vermelha por clorofilas (a e b) e reflectância do infravermelho pela estrutura mesofílica nas folhas (GLENN et al. 2011).

Diversos IV foram propostos com o objetivo de estudar as características espectrais da vegetação, principalmente nas regiões do visível e do infravermelho próximo.

Alguns IV possuem a finalidade de suprimir o efeito do brilho do solo nos casos em que a vegetação é espalhada onde os pixels contêm uma mistura de vegetação verde e solo de fundo. Essa é uma importância particular dos IV nos estudos em ambientes áridos e semiáridos, sendo que os índices utilizados para este fim são: NRVI (*Normalized Ratio Vegetation Index*); PVI (*Perpendicular Vegetation Index*); DVI (*Difference Vegetation Index*); SAVI (*Soil Ajusted Vegetation Index*); TSAVI (*Transformed Soil Ajusted Vegetation Index*); MSAVI₂ (*Modified Soil Ajusted Vegetation Index*); WDVI (*Weighted Difference Vegetation Index 2*) (MARCUSSEI et.al., 2010).

O SAVI, criado por Huete (1988), foi desenvolvido com uma modificação na fórmula do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), que acrescenta uma constante L que tem a função de corrigir a influência da luminosidade do solo quando a cobertura vegetativa é baixa. O resultado final do índice varia de -1 a 1; quanto menor o valor, menor a cobertura do solo. Assim, a fórmula para o cálculo do SAVI é dada pela Equação 1:

$$SAVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED+L} \times (1 + L) \quad (1)$$

Sendo: NIR corresponde a banda do infravermelho; RED corresponde a banda do vermelho; L representa a variável de ajuste do solo, sendo que para a vegetação muito baixa, é sugerido utilizar o fator L = 1, para vegetação intermediária L = 0,5; para altas densidades L = 0,25 e para L = 0 o valor do SAVI será idênticos ao do NDVI.

Posteriormente foi proposto por Qi et al. (1994) o MSAVI₂ (*Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2*), que é uma revisão do índice SAVI. Esse índice procurou resolver algumas limitações do SAVI quando aplicado em áreas com um elevado grau

de superfície do solo exposto. O problema com o índice original de vegetação ajustado ao solo (SAVI) é que é necessário especificar o fator de brilho de correção do solo (L) com base na quantidade de vegetação na área de estudo. No $MSAVI_2$ foi adicionado um fator de auto ajuste para L, de acordo com a Equação 2.

$$MSAVI_2 = \frac{(2 \times NIR + 1 - \sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - RED)})}{2} \quad (2)$$

Sendo: NIR corresponde a banda do infravermelho e RED corresponde a banda do vermelho.

Na literatura são encontrados diversos estudos avaliando a usabilidade dos IV nas ciências agrárias. Paula et al. (2017) estudaram a variação da ETo e do Índice de Vegetação Melhorado (EVI) para o município de Botucatu – SP e, constataram, espacialmente, uma significativa correlação entre o EVI e a ET, evidenciando que as flutuações destes índices provocam impacto direto um no outro.

Padilla et al. (2011) relacionaram o índice de vegetação SAVI a um modelo de balanço hídrico para estimar a evapotranspiração das culturas do trigo e milho. Neste estudo as estimativas ET foram comparadas com o fluxo de calor latente medido e com medições de lisímetros de pesagem. As superestimativas de ET diária de 8 e 11% foram obtidas para o milho e o trigo, respectivamente. Quando os dados do sensor de satélite substituíram os dados de radiometria de campo, os valores de superestimação mudaram ligeiramente para 9 e 6% para as mesmas duas culturas.

Mateos et al. (2013) monitoraram a evapotranspiração de culturas irrigadas usando coeficientes de colheita derivados de séries temporais de imagens de satélite. Esses autores verificaram a relação do Kc com os IV. Concluíram que o método IV-ET, utilizando o SAVI, é válido e robusto para estimar a evapotranspiração espacialmente distribuída em grandes áreas irrigadas

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Área de estudo

O estudo foi realizado no Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí (DITALPI), localizado no município de Parnaíba, região Norte do Estado do Piauí, com coordenada central 03 ° 00' S, 41°47' W e 40 m de altitude (Figura 1). O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Aw', tropical chuvoso, com umidade relativa do ar média anual de 74,9%, temperatura média do ar de 27,9 °C, evapotranspiração de referência média de 5,4 mm e precipitação média anual de 965 mm, porém, concentradas de janeiro a maio (BASTOS et al., 2000).

No DITALPI encontra-se a maior produção de acerola (*Malpighia emarginata*) orgânica do estado do Piauí e o maior volume de informações disponíveis direcionou o estudo para sete lotes de pequeno produtor (LP), cada um deles contendo uma área de 8,5 ha produzindo acerola organicamente. Os lotes selecionados foram: LP.08.49; LP.08.50; LP.08.67; LP.03.D.05; LP.04.D.19; LP.04.D.24; LP.04.E.25 e LP.04.E.27.

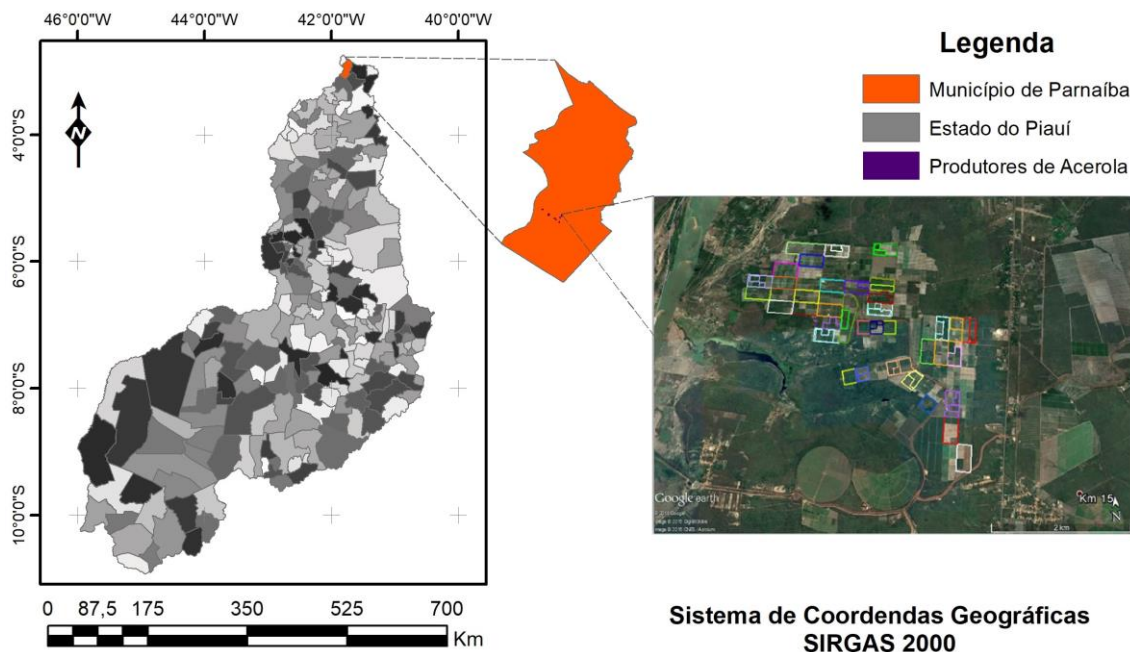


Figura 1 - Localização do Município de Parnaíba, no estado do Piauí, Brasil e Localização da área de estudo (DITALPI) no município de Parnaíba.

O DITALPI possui relevo plano e suave ondulado, com terras que oferecem restrições de drenagem. Está presente no distrito Latossolo Amarelo, Argissolo Vermelho Amarelo e Neossolo Quartzarênico, nomenclatura de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013).

O suprimento hídrico é feito por meio do Rio Parnaíba (perene). Os sistemas de irrigação utilizados no perímetro irrigado estão distribuídos em microaspersão com 47,35% da área, gotejamento ocupando uma área de 34,05 % e pivô central correspondendo a 18,60 % da área. A área total do DITALPI equivale a 10.000 ha, segundo o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS (1998).

3.1.2 Plano de cultivo e volumes de água aplicados às parcelas

Os planos de cultivos tratam-se de planilhas eletrônicas contendo informações sobre as coordenadas geográficas dos lotes e, dentro de cada lote, das parcelas com cultivo da aceroleira; as planilhas contemplam ainda as datas de colheita e produtividades. Estes planos de cultivos foram fornecidos pelas cooperativas que gerenciam a produção de acerola no DITALPI, sendo elas a Bio Fruta, Orgânicos e Parnaíba Litoral.

Os volumes de água aplicados, mensalmente, em cada lote foram fornecidos pela gerência do Distrito de Irrigação (DITALPI). Com base no volume de dados fornecidos pela gerência do DITALPI, optou-se por estudar a série histórica de 2014 a 2015.

Os dados climáticos do período estudo foi coletado de uma estação agrometeorológica local. Estas informações foram utilizadas para a confecção de gráficos e mapas.

3.1.3 Imagens de satélite utilizadas

Foi utilizado um conjunto de imagens, do satélite LANDSAT 8, sensor OLI (*Operational Land Imager*), correspondendo a órbita ponto 219/62, no período de janeiro de 2014 a dezembro de 2015. Estas imagens foram obtidas no catálogo de imagens do portal USGS (*United States Geological Survey*), as quais se encontram corrigidas atmosféricamente e ortorretificadas ao nível de processamento *Standart*

Terrain correction Level 1T ou *Level 1G* (EUA, 2014). As características das bandas utilizadas nas imagens estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características das bandas 4 (vermelho) e 5 (infravermelho) do sensor OLI - Satélite Landsat 8

Bandas espectrais	Comprimento de onda (μm)	Resolução espacial (metros)	Resolução temporal (dias)	Resolução Radiométrica (bits)
Banda 4 (RED)	0,64 – 0,67	30	16	16
Banda 5 (NIR)	0,85 – 0,88	30		

Fonte: adaptado de Roy (2014)

Foram utilizadas 33 imagens no período de janeiro de 2014 a dezembro de 2015. Sendo 15 imagens no ano de 2014 e 18 imagens em 2015. Ressalta-se que há uma grande dificuldade de encontrar imagens sem nebulosidade ou com porcentagem baixa de nuvens em regiões litorâneas.

3.1.4 Programas utilizados

No desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados os programas ArcGis versão 10.3 (ESRI, 2015) para o processamento de imagens; o Google Earth Pro (GOOGLE, 2001), para a obtenção de imagens para cálculo da Fração de Cobertura (F_c) e CROPWAT (FAO, 1989) para calcular o Balanço Hídrico da Cultura.

3.2 Métodos

3.2.1 Calibração radiométrica

A calibração radiométrica consiste na conversão do número digital (ND) de cada pixel da imagem em valores físicos. O ND é definido como a intensidade do pixel e sua amplitude muda de acordo com a resolução radiométrica do sensor. Portanto, converteu-se os ND em radiância espectral monocromática. Este parâmetro foi obtido segundo a Equação 3, proposta por Markhan e Baker (1987).

$$L_{\lambda i} = \frac{(L_{\max} - L_{\min})}{(Q_{\max} - Q_{\min})} \times (Q_{\text{cal}} - Q_{\min}) + L_{\min\lambda} \quad (3)$$

Sendo: $L_{\lambda i}$ é a radiância espectral monocromática na banda em $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$; L_{max} e L_{min} são as radiâncias máxima e mínima na banda, respectivamente; Q_{max} e Q_{min} são as radiâncias máxima e mínima escalonada em ND; e Q_{cal} é o nível digital no pixel da imagem em questão.

De posse das imagens de radiância espectral de cada banda, das informações sobre o $\cos \theta$ e irradiância espectral no topo da atmosfera, estimou-se a refletância espectral da superfície utilizando a Equação 4, descrita em Chander et al. (2009).

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \times L_{\lambda} \times d^2}{ESUN_{\lambda} \times \cos(\theta)} \quad (4)$$

Sendo: ρ_{λ} é a refletância aparente ou de topo da atmosfera (adimensional); L_{λ} é a radiância bidirecional aparente ($W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$); d é a distância Sol-Terra em unidades astronômicas; $ESUN_{\lambda}$ é a irradiância solar exoatmosférica média no topo da atmosfera ($W/(m^2 \cdot \mu m)$); e θ é o ângulo zenital solar em graus.

3.2.2 Estimativa do índice de vegetação

Após o cálculo de determinação das refletâncias das imagens Landsat 8, correspondentes ao DITALPI, procedeu-se com o cômputo do índice de vegetação MSAVI₂, que assim como outros índices, analisa a condição da vegetação em campo por meio de sensoriamento remoto. Este índice é um componente base para a estimativa do $K_{CMSAVI2}$, que será abordado nos próximos itens.

O MSAVI₂ é uma nova imagem representando a vegetação, com valores contidos em uma escala de -1 a 1. Os pixels das imagens que apresentam valores mais próximos de 1 indicam vegetação mais vigorosa, enquanto que o menor vigor é representado por pixels com valores próximos a -1. Para efetuar o cálculo deste índice utilizou-se a Equação 2, descrita por Qi et al. (1994).

3.2.3 Fração de Cobertura

A Fração de Cobertura (F_c) é um parâmetro essencial para a estimativa do Coeficiente de Cultura por Índice de Vegetação ($K_{CMSAVI2}$). Na Figura 2 está representado o fluxograma do processamento da F_c .

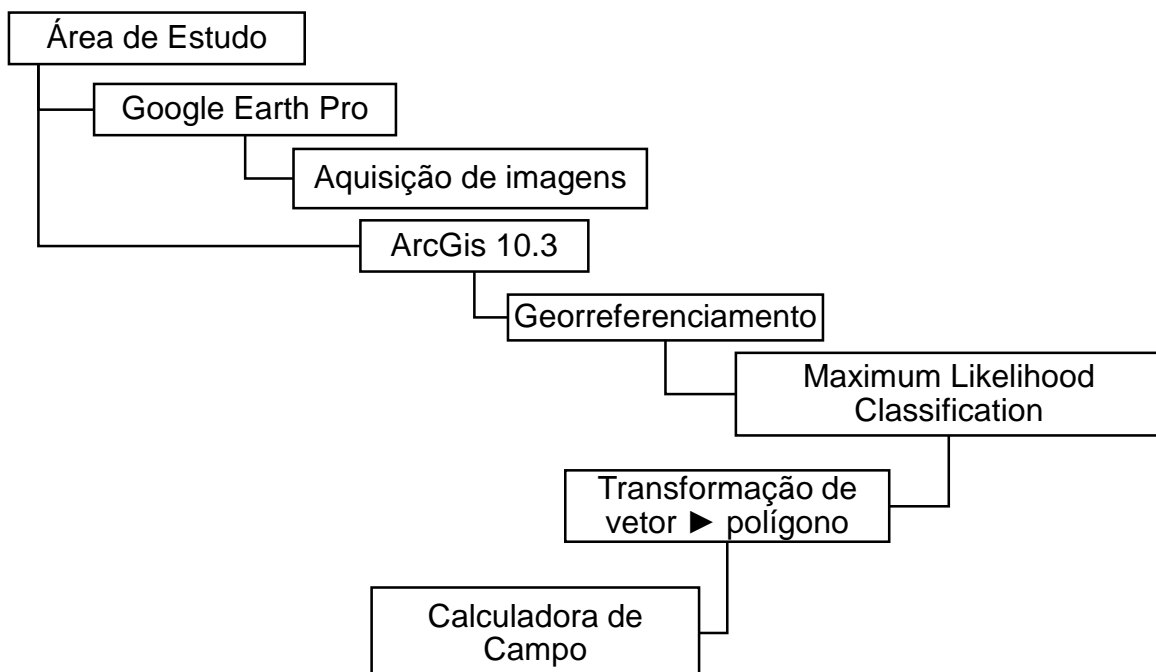
De posse de imagens provenientes do Google Earth Pro, foram georreferenciados os sete lotes do DITALPI, utilizando o programa ArcGis 10.3, por meio da ferramenta de ajuste *Projective Transformation*.

Em seguida, realizou-se a classificação supervisionada das imagens por Máxima Verossimilhança (*Maximum Likelihood Classification*), a fim de identificar a área efetivamente ocupada pela cultura da acerola em detrimento ao solo. Para isso, foram realizadas 200 amostras de treinamento para as classes acerola e solo exposto para cada lote.

Dos resultados da classificação supervisionada foram confeccionados mapas em formato vetorial, o seu formato foi transformado em matricial e, posteriormente, em polígonos, afim de contabilizar utilizando a calculadora de campo, dentro da área útil, a área correspondente a vegetação e solo.

Com os resultados provenientes desta classificação pôde-se calcular a Fc por meio da razão entre área efetivamente ocupada pela cultura e a área da parcela.

Figura 2 – Fluxograma de processamento da Fração de Cobertura.



3.2.4 Coeficiente de cultura ajustado por sensoriamento remoto

Para se obter um Coeficiente de Cultura modificado por Sensoriamento Remoto utilizou-se as Equações 5 e 6 propostas por Gonzalez-Dugo et al. (2009). A Equação 6 relaciona o K_c da cultura, a F_c e os valores máximos, médios e mínimos do índice de vegetação $MSAVI_2$, que já foram computados anteriormente. Este Coeficiente de Cultura modificado por Sensoriamento Remoto foi chamado de K_{cMSAVI_2} e seus valores fizeram parte do processamento dos balanços hídricos e, por conseguinte, da estimativa da ET_c . Cabe ressaltar que Gonzalez-Dugo et al. (2009) descrevem este algoritmo apresentado pela Equação 6 utilizando o Índice de Vegetação (IV) SAVI, porém o autor deste estudo realizou uma alteração do IV para $MSAVI_2$, por ser um índice mais robusto para o caso.

$$K_{cMSAVI_2} = \frac{K_{c_{max}}}{F_{c_{max}}} \left[\frac{(MSAVI_2 - MSAVI_{2_{min}})}{(MSAVI_{2_{max}} - MSAVI_{2_{min}})} \right] \quad \text{Se } F_c < F_{c_{max}} \quad (5)$$

$$K_{cMSAVI_2} = K_{c_{max}} \quad \text{Se } F_c \geq F_{c_{max}} \quad (6)$$

Sendo: K_{cMSAVI_2} é o coeficiente de cultivo com base no índice de vegetação; $K_{c_{max}}$ corresponde ao coeficiente de cultivo máximo do cultivo; $F_{c_{max}}$ é fração de cobertura do cultivo para K_c máximo; F_c é a fração de cobertura do cultivo com o $MSAVI_2$ médio; $MSAVI_2$ é o índice de vegetação médio de cada cultivo; $MSAVI_{2_{max}}$ é índice de vegetação máximo de cada cultivo; e $MSAVI_{2_{min}}$ corresponde ao índice de vegetação mínimo de cada cultivo.

O Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) são os mais comuns IV utilizados para estimar K_c por SR. Foi objeto deste estudo utilizar o $MSAVI_2$ que elimina a necessidade de especificar explicitamente o fator de correção do brilho do solo (L), uma vez que ele calcula automaticamente este fator para cada *pixel* da imagem. Com isso, foi possível determinar n fatores de correção do brilho do solo (L) para cada *pixel* da imagem. Desta maneira, o uso deste IV possibilitou um menor grau de incerteza ao definir o grau de cobertura do solo.

3.2.5 Balanço Hídrico – CROPWAT

O Balanço Hídrico da Cultura (BHC) foi realizado com o programa CROPWAT para 2014 e 2015, utilizando como dados de entrada o clima, solo e cultura. O BHC foi calculado em dois cenários: verificando as práticas de irrigação realizadas pelos produtores do DITALPI e simulando condições ideais para o perímetro irrigado.

3.2.5.1 Entrada de dados das variáveis meteorológicas

A partir do módulo *Climate/ETo* do CROPWAT, o primeiro a ser preenchido, inseriu-se os registros climáticos diários dos anos de 2014 e 2015. Os elementos climáticos que alimentaram o programa foram Temperaturas máximas e mínimas do ar em °C; Umidade relativa do ar em %; Velocidade do vento em m/s e Insolação em horas, obtidos em uma estação agrometeorológica local. Com estes registros inseridos, pôde-se calcular a Radiação Solar Global em MJ m⁻² dia⁻¹ e, posteriormente, a estimativa da Evapotranspiração de Referência (ET_o) em mm dia⁻¹, a qual é obtida, na rotina de cálculo do programa CROPWAT, pelo método de Penman-Monteith descrito por Allen et al. (1998).

Em seguida, utilizou-se o módulo *Rain* para a entrada dos registros de precipitações pluviais em mm dia⁻¹, de todos os meses dos anos de 2014 e 2015. Neste módulo, utilizou-se para o cálculo da precipitação efetiva o método USDA (*USDA Soil Conservation Service*), que utiliza o princípio de balanços hídricos, relacionando a entrada e saída das chuvas, por escoamento superficial, percolação e a água retida na zona radicular da cultura.

3.2.5.2 Entrada de dados das variáveis da cultura

Para preencher o módulo *Crop*, informou-se ao programa dados relativos a cultura, como: Nome da cultura; Data de plantio; Coeficiente de Cultivo (K_c); Estádios de desenvolvimento da cultura em dias; Profundidade do sistema radicular (Z) em metros; Fator de disponibilidade de água no solo (p) e coeficiente de sensibilidade da cultura ao déficit hídrico (k_y). As informações estão citadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de entrada para o módulo *Crop* no programa CROPWAT 8.0, com informações do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí - DITALPI

Variáveis de entrada no módulo <i>Crop</i>	
Nome da cultura	Acerola
Data de plantio	01/01/2014 e 01/01/2015
Estádios de Desenvolvimento	90 – 122 – 92 – 61 dias
Profundidade de raiz	0,69 m
p	0,50
Ky	0,50

No campo Kc, foram inseridos valores ajustados por sensoriamento remoto, já nomeado anteriormente como $K_{CMSAVI2}$, obtidos na primeira fase de execução do estudo. Estes coeficientes foram definidos, individualmente, para cada estágio de desenvolvimento durante os anos de 2014 e 2015 para todos os lotes. Com exceção do Kc, os demais parâmetros foram iguais para todos os lotes.

Os estágios de desenvolvimentos foram dimensionados com base nos critérios climáticos e tratos culturais realizados no DITALPI.

3.2.5.3 Entrada de dados das variáveis do solo

No módulo *Soil* informou-se a denominação do solo, a Capacidade de Água Disponível (CAD) em mm m^{-1} , encontrado em Maschio et al. (2008); Taxa máxima de infiltração de água no solo em mm m^{-1} ; Profundidade máxima de enraizamento da cultura em cm; Depleção inicial do teor de água no solo em %. Os valores utilizados encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de entrada para o módulo *Soil* no programa CROPWAT 8.0, com informações do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí - DITALPI.

Variáveis do módulo <i>Soil</i>	
Capacidade de Água Disponível (CAD)	75,0 mm m^{-1}
Taxa máxima de infiltração de água no solo	50 mm dia^{-1}
Profundidade máxima de enraizamento	900 cm
Depleção inicial do teor de água no solo	0 %

Para a taxa máxima de infiltração foi definido um valor próximo a CAD e encontra-se dentro dos padrões estimados por Bernado et al. (2006). Além disso, também foi definido como 900 cm o valor da profundidade máxima de enraizamento, indicando que o solo não tem características que impeçam o crescimento das raízes. A depleção inicial foi zero, que é um valor padrão indicativo que o solo se encontrava na Capacidade de Campo (CC).

3.2.5.4 Saída de dados da necessidade hídrica da cultura

No módulo *Crop Water Requirement* (CWR) foi feito todo o cômputo das variáveis informadas nos módulos anteriores. Estes dados foram visualizados por meio de uma tabela em escala temporal decendial (dec) contendo o Estádio de desenvolvimento da cultura; o Kc por dec; ETc em mm dia⁻¹ e mm dec⁻¹; Precipitação efetiva em mm dec⁻¹ e Irrigação requerida pela cultura em mm dec⁻¹.

Para cada lote avaliado, os valores de ETc obtidos foram empregados na estimação dos índices de eficiência e de produtividade da água, possibilitando a avaliação do impacto de cada valor de coeficiente de cultivo ajustado (K_{CMSAVI2}) na estimativa dos índices em questão.

3.2.6 Índices de eficiência e produtividade da água

Foram utilizados os índices sugeridos por Bos et al. (2005), para estimar a eficiência e produtividade da água de irrigação no DITALPI, sendo eles: Índice de Evapotranspiração Relativa (RET), Coeficiente de Deficiência Hídrica (CDW), Índice de Uso Consuntivo da Água de Irrigação (ICUC), Índice de Suprimento Relativo de Irrigação (RIS) e Índice de Produtividade da Água (WP), conforme as Equações de 7 a 13.

$$RET = \frac{ETc}{ETp} \quad (7)$$

Sendo: RET é o índice de evapotranspiração relativa (adimensional); ETc corresponde a evapotranspiração real do cultivo (m³); e ETp a evapotranspiração potencial do cultivo (m³);

$$CDW = 1 - \frac{ETc}{ETp} \quad (8)$$

Sendo: CDW é o coeficiente de deficiência hídrica (adimensional)

$$\Delta A = Af - Ai \quad (9)$$

Sendo: ΔA – variação do armazenamento de água no solo (m^3); Af – conteúdo de água no solo no dia do transplante (m^3); e Ai – conteúdo de água no solo no dia da colheita (m^3)

$$ICUC = \frac{ETc - Re - \Delta A}{Ia} \quad (10)$$

Sendo: ICUC é o índice de uso consuntivo da água de irrigação (adimensional); Re a precipitação efetiva (m^3); ΔA representa variação do armazenamento de água no solo (m^3); e Ia é o volume de irrigação aplicado (m^3)

$$Re = R - Pp - Es \quad (11)$$

Sendo: R é a precipitação (m^3); Pp é a percolação profunda (m^3); e Es o escoamento superficial (m^3)

$$RIS = \frac{Ia}{Ip} \quad (12)$$

Sendo: RIS é o índice de suprimento relativo de irrigação (adimensional) e Ip o volume de irrigação potencial (m^3)

$$WP = \frac{P}{ETc} \quad (13)$$

Sendo: WP é o índice de produtividade da água evapotranspirada pelos cultivos ($kg\ m^{-3}$); P – produção total dos cultivos (kg).

Os parâmetros necessários na estimativa dos índices de eficiência e de produtividade da água foram convertidos em unidade de volume (m^3), multiplicando-se os respectivos parâmetros obtidos dos balanços hídricos de água no solo (m) pela área ocupada por cada cultivo (m^2). Essa conversão foi necessária uma vez que a estimativa dos índices foi processada para cada lote.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Configuração climática

Verifica-se nas Figuras 3 e 4 a variação temporal da Precipitação (P) mensal, Precipitação Efetiva (PEF) mensal e Temperatura média (TMED) de 2014 e 2015, respectivamente. Estes dados foram obtidos em uma estação agrometeorológica convencional local.

É indicado, na figura, maiores precipitações pluviais no primeiro semestre do ano, além disso observa-se que a TMED variou de 26,9 °C a 29,4 °C e foi menor nos meses de maiores precipitações. Em 2014 a precipitação total foi de 978,9 mm sendo a precipitação efetivamente (PEF) utilizado pela cultura 544,6 mm. Já, em 2015, a precipitação total foi de 692,7 mm enquanto que a PEF foi de 409,6 mm.

Durante o segundo semestre dos anos de 2014 e 2015 notou-se que as precipitações foram nulas ou insignificantes para a cultura da aceroleira, a TMED apontou maiores temperaturas durante esse período. Com isso é possível perceber que as precipitações pluviais ocorridas na região são altas e mal distribuídas.

Figura 3 – Variação temporal da Precipitação (P) mensal, Precipitação Efetiva (PEF) mensal e Temperatura média (TMED) do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí para 2014

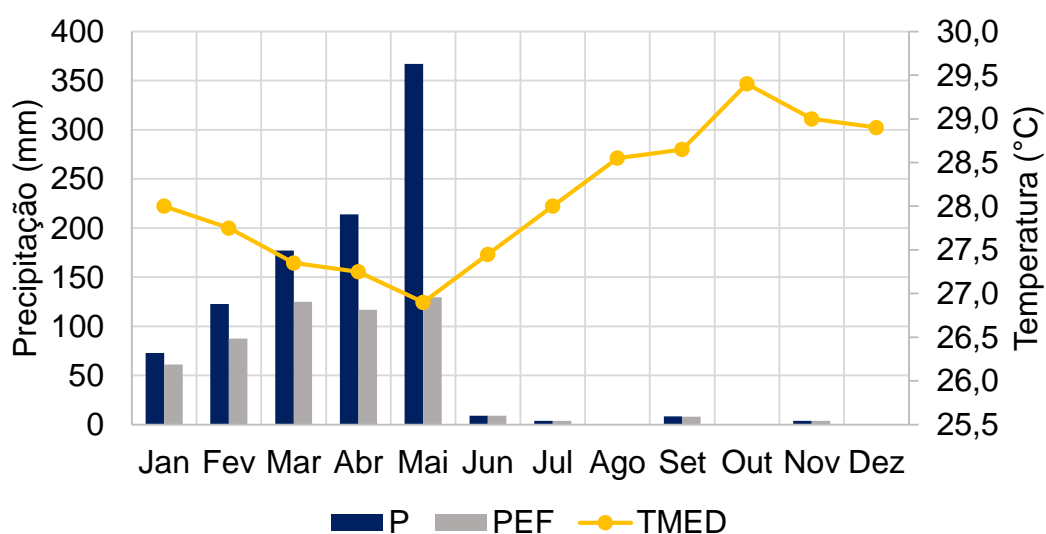
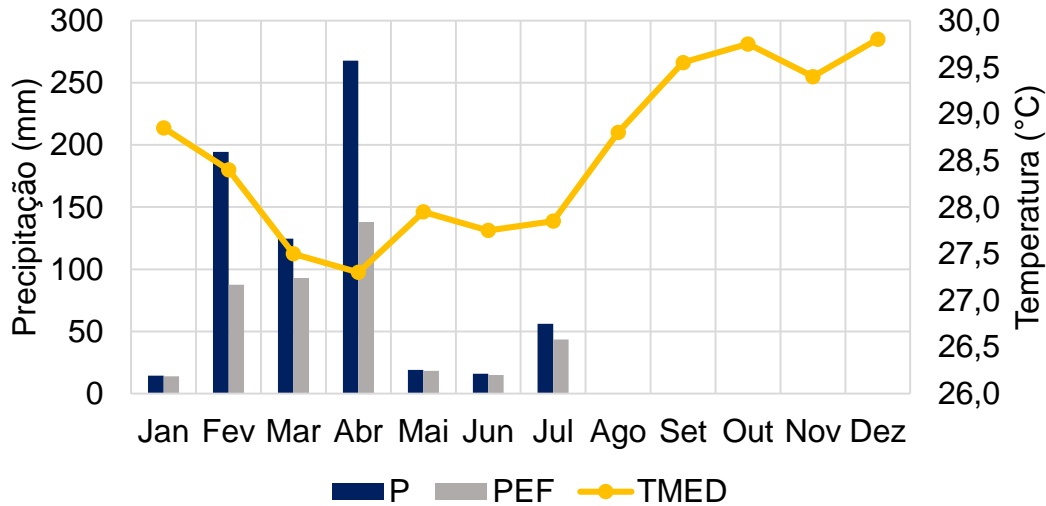
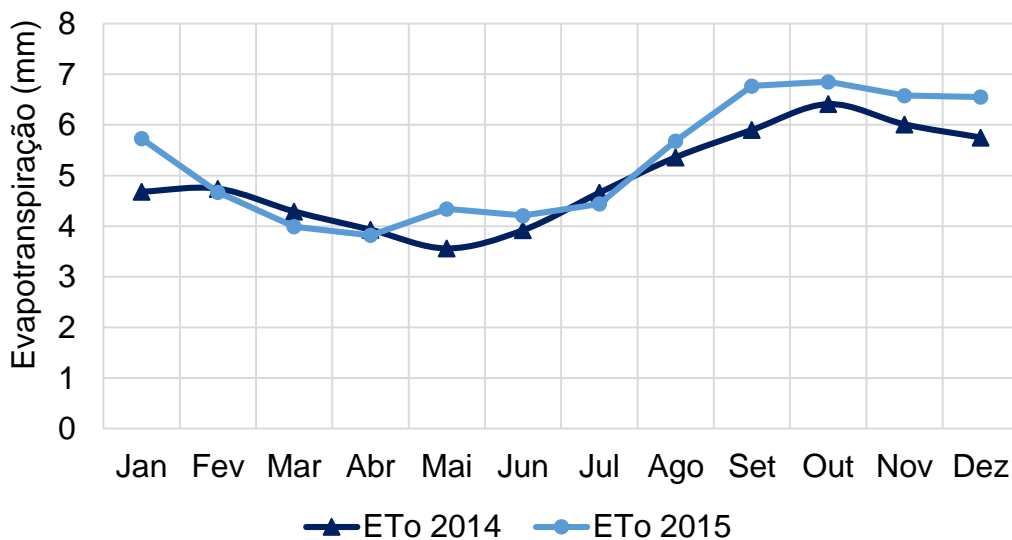


Figura 4 - Variação temporal da Precipitação (P) mensal, Precipitação Efetiva (PEF) mensal e Temperatura média (TMED) do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí para 2015



Na Figura 5 é exposta a variação temporal da Evapotranspiração de Referência (ETo) para os anos de 2014 e 2015. Sabe-se que segundo o comportamento das variáveis climatológicas (precipitação, temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e insolação), a ETo é afetada, pois nos meses de maiores registros de temperatura e menores precipitações, verificou-se maior ETo.

Figura 5 - Variação temporal da Evapotranspiração de Referência (ETo) do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí para 2014 e 2015



4.2 Volume de água aplicado e produção de acerola do DITALPI

Os volumes mensais de água aplicados aos lotes, durante o período de janeiro de 2014 a dezembro de 2015, estão apresentados nas Figuras 6 e 7. Esses gráficos foram gerados a partir do banco de dados fornecido pelo DITALPI e Cooperativas da aceroleira.

O volume de água aplicado durante o primeiro semestre de 2014 correspondeu a 47.700 m³, sendo 42% inferior ao volume aplicado durante o segundo semestre, que foi de 82.861 m³. O volume total de água aplicado em 2014 foi de 130.561 m³, 34% maior que no ano de 2015, que foi 97.186 m³, sendo um volume de 42.006 m³ no primeiro semestre e, 55.180 m³ no segundo semestre. A tendência de maior aplicação de água no segundo semestre é claramente evidenciada nas Figuras 6 e 7. Além disso, tal fato é decorrente das temperaturas elevadas e baixos valores de pluviosidade no segundo semestre do ano, resultando na concentração de altas demandas evapotranspirométricas.

Figura 6 - Volumes mensais de água, em m³, aplicados a sete lotes do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí – DITALPI, em 2014

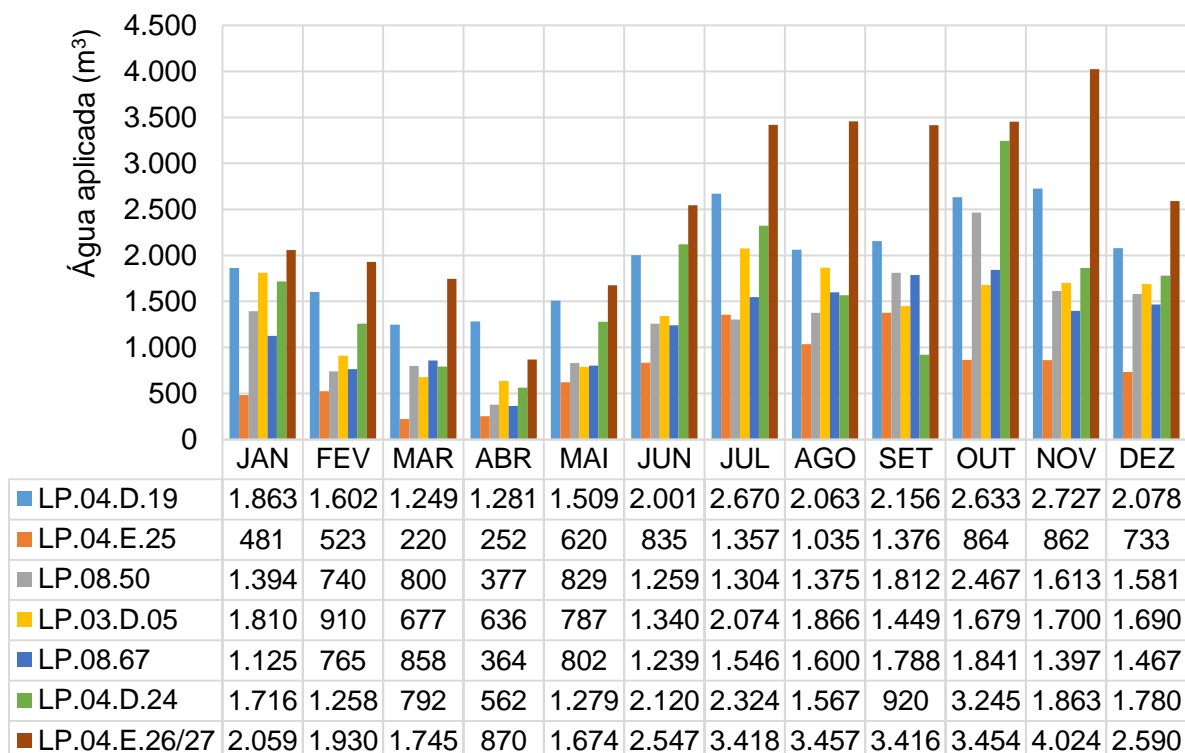
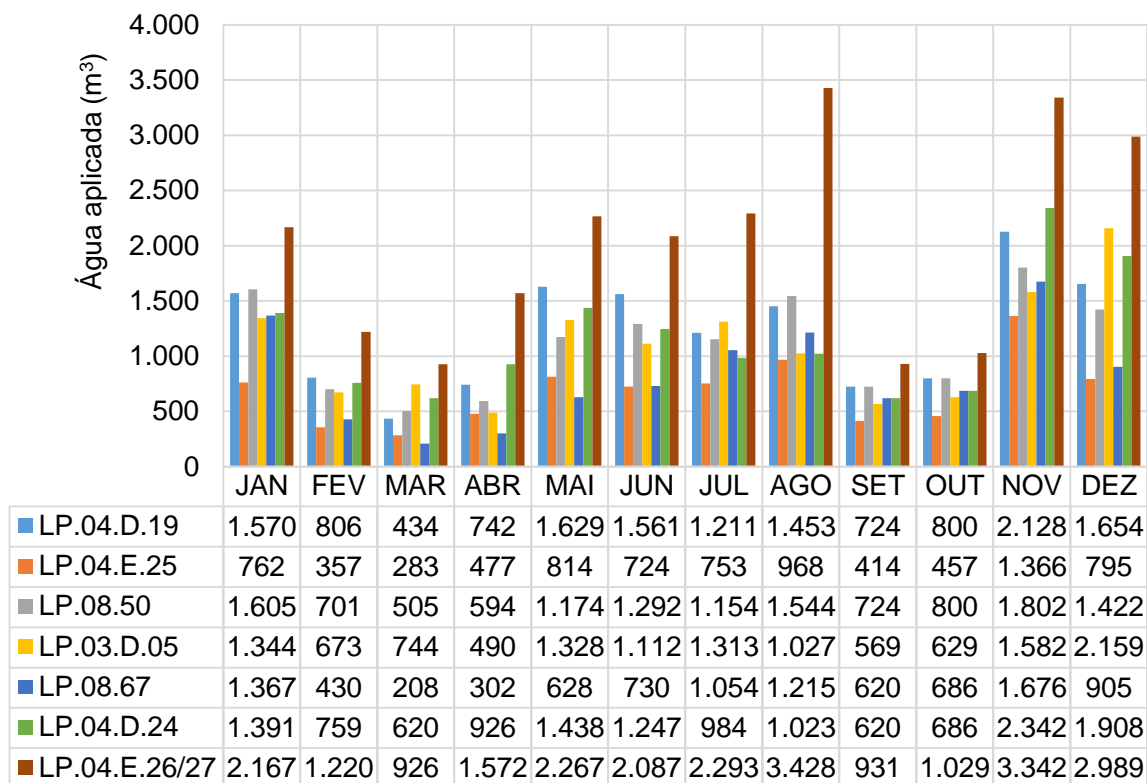


Figura 7 - Volumes mensais de água, em m³, aplicados a sete lotes do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí – DITALPI, em 2015



Nas Figuras 8 e 9 tem-se a produção de acerola dos sete lotes em análise, durante os anos de 2014 e 2015, respectivamente. As produções de acerola são distintas entre lotes e entre os meses; tal fato está associado aos fatores climáticos e principalmente a autonomia de cada produtor nas tomadas de decisões no tocante a tratamentos culturais e manejo de irrigação.

No ano de 2014, a produção de acerola foi de 740.178 kg, sendo 59% obtido no primeiro semestre. Já no segundo semestre deste ano a produção foi 31% menor, a qual correspondeu a 301.017 kg de acerola. Em 2015 a produção foi 23% menor em relação a 2014 e seguiu o mesmo comportamento, com maior produção no primeiro semestre, de 377.290 kg e menor no segundo semestre, de 222.310 kg.

Figura 8 - Produção mensal de acerola, em kg, de sete lotes do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí – DITALPI, em 2014

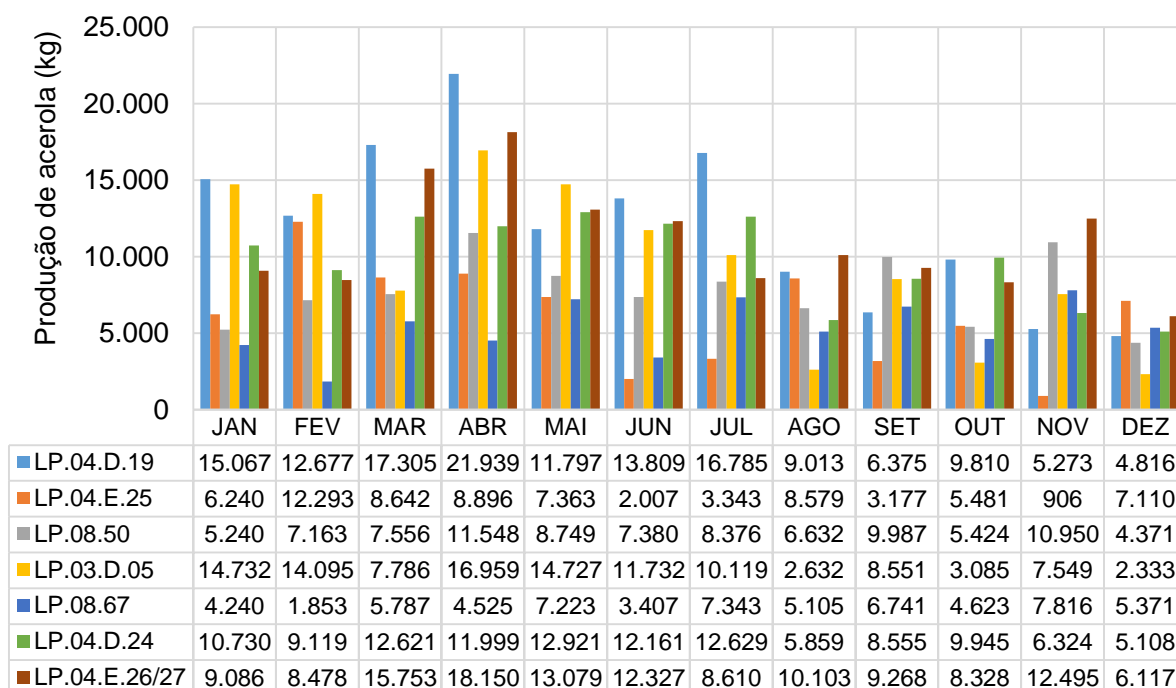
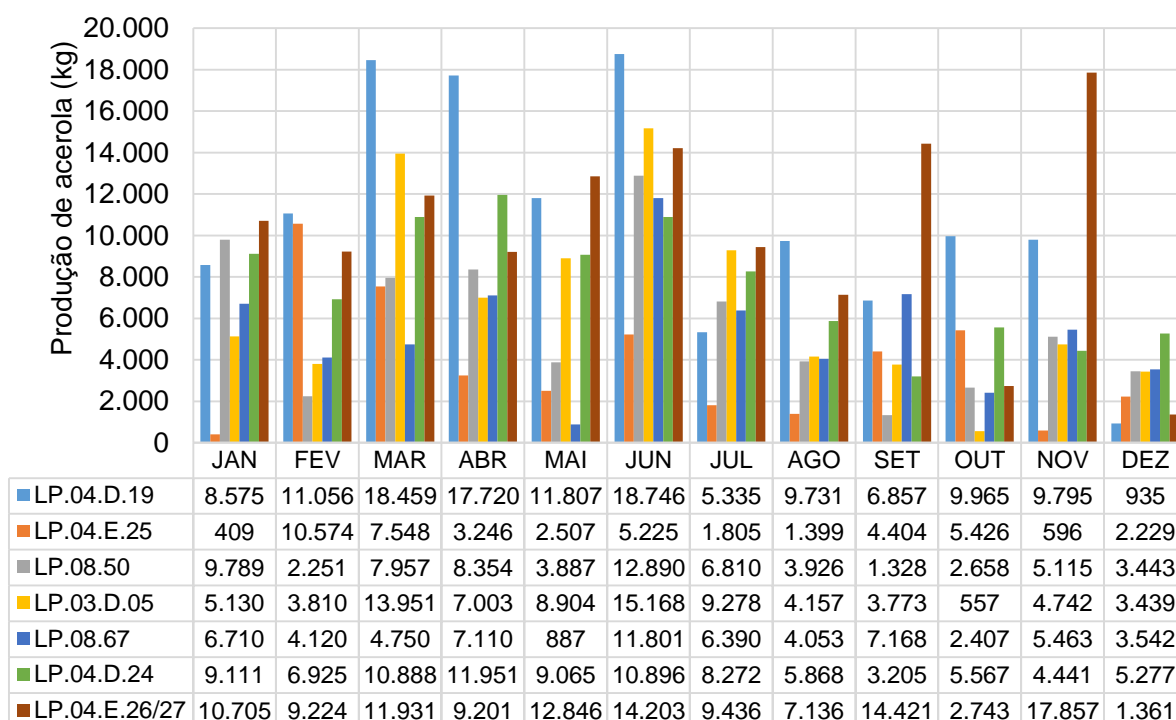


Figura 9 - Produção mensal de acerola, em kg, de sete lotes do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí – DITALPI, em 2015



Relacionando os quatro gráficos (figuras 6 a 9) foi possível detectar que de janeiro a junho aplicou-se menor volume de água de irrigação e obteve-se maior

produção e o inverso ocorreu de julho a dezembro, ou seja, maior volume de água aplicado e menor produção. Este comportamento está relacionado a dois fatores: a precipitação efetiva, que está presente durante o primeiro semestre dos anos de 2014 e 2015 e ausente durante os segundos semestres e ao manejo de poda da cultura, que é realizado de agosto a dezembro.

Em 2014 e 2015, os produtores do DITALPI estão produzindo em média 25 t ha⁻¹ano⁻¹, considerada uma boa produtividade e encontra-se dentro das médias de produtividade encontradas no Projeto Irrigado Senador Nilo Coelho, em Petrolina, PE (CALGARO; BRAGA, 2012).

4.3 Fração de Cobertura (Fc)

Na Tabela 4 constam as informações sobre a AU (Área Útil que representa a área onde está efetivamente instalada a cultura), SD (Área com solo descoberto); AT (Área Total que é correspondente ao somatório de AU e SD em ha) e Fc (Fração de Cobertura que é razão entre AU e AT, adimensional). A Fc é um índice que representa o quanto da área de plantio está ocupado pela cultura. A escala da Fc variou de 0,37 a 0,71, com média de 0,58. Quando se tem Fc mais próximas de um, supõe-se áreas com plantas em estágio adulto e saudáveis, com boa formação de copa e densidade de plantas adequada.

Tabela 4 - Valores de Área útil, Solo descoberto, Área total e Fração de cobertura calculados por sensoriamento remoto, correspondente a sete lotes do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí - DITALPI

Lotes	Área Útil (ha)	Solo Descoberto (ha)	Área Total (ha)	Fração de Cobertura
LP.04.D.19	3,62	1,45	5,07	0,71
LP.04.E.25	1,66	2,78	4,44	0,37
LP.08.50	2,11	1,51	3,62	0,58
LP.03.D.05	2,29	1,73	4,02	0,57
LP.08.67	2,05	0,95	3,00	0,68
LP.04.D.24	2,55	1,34	3,89	0,66
LP.04.E.26/27	2,88	2,57	5,45	0,53
Média				0,58

A Fc da vegetação é uma variável importante para descrever a qualidade da vegetação e reflete as mudanças no ecossistema. Também é um fator que está relacionado com a transpiração, fotossíntese, degradação da terra e desertificação em regiões áridas e semiáridas. Shobairi e Li (2016) relacionaram os conceitos do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) em busca de modelar a Fc de uma floresta situada na província de Guangdong, em uma série histórica de 10 anos verificaram que a Fc média foi de 0,783. Nas culturas do trigo (*Triticum* spp.), milho (*Zea mays*) e soja (*Glycine max*) as Fc foram 0,80 segundo Padilla et al. (2011) e Gonzalez-Dugo et al. (2009).

Em virtude da aceroleira ser uma planta pouco estudada na área do sensoriamento remoto, não foram encontrados registros de Fc na literatura. Entretanto, ela se comporta semelhantemente ao Fc de outras fruteiras como oliveira (*Olea europaea*) e pessegueiro (*Prunus persica*), ambos com 0,50 segundo Mateos et al. (2013).

4.4 Índice de vegetação MSAVI₂

As Figuras de 10 a 16 representam a resposta do Índice MSAVI₂ para os sete lotes do DITALPI correspondendo ao período de 2014 a 2015. Em virtude do DITALPI situar-se no litoral, não foi possível obter um período completo de 24 imagens por lote em razão da nebulosidade observada no local. Cada mapa indica o período e a escala de cores com intervalos entre o vermelho e o verde, que significam menores e maiores MSAVI₂, respectivamente.

Constatou-se que este índice não admitiu nenhum resultado abaixo de zero, que é um indicativo da ausência de corpos hídricos e nuvens. Os *pixels* alocados dentro do intervalo de coloração do vermelho ao alaranjado estão mais próximos de zero e representaram solo sem vegetação ou plantas com deficiência hídrica. Já os *pixels* com tonalidades entre amarelo e verde estão mais próximos de 1 e significaram que, quanto maiores os valores do MSAVI₂, mais vigoroso está o cultivo. Todavia, faz-se necessário estudos mais aprofundados que definam uma classificação quanto ao estágio de desenvolvimento da cultura e produtividade para o MSAVI₂.

A resposta do MSAVI₂ ao comportamento da vegetação não é exatamente explicada por um único fator, em virtude das propriedades possuírem manejos de irrigação, adubações e capinas diferenciados a cada lote, bem como a resolução

temporal do satélite Landsat 8 ter repetitividade de 16 dias. Entretanto, notou-se nas feições respectivas ao segundo semestre dos anos de 2014 e 2015 uma predominância de *pixels* com tonalidades alaranjadas. Este fato está relacionado com as precipitações pluviais inexistentes nesse período.

Cabe ressaltar, também, que de agosto a dezembro os produtores realizam as atividades de podas de frutificação, entretanto, eles não realizam essa poda gradativamente e tampouco todos em conjunto, por isso verifica-se nas imagens que há uma diferença da escala de vigor do MSAVI₂ comparando o mesmo mês nas diferentes propriedades.

Figura 10 – MSAVI₂ mensal correspondente ao Lote LP.04.D.19 do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, para os anos de 2014 e 2015

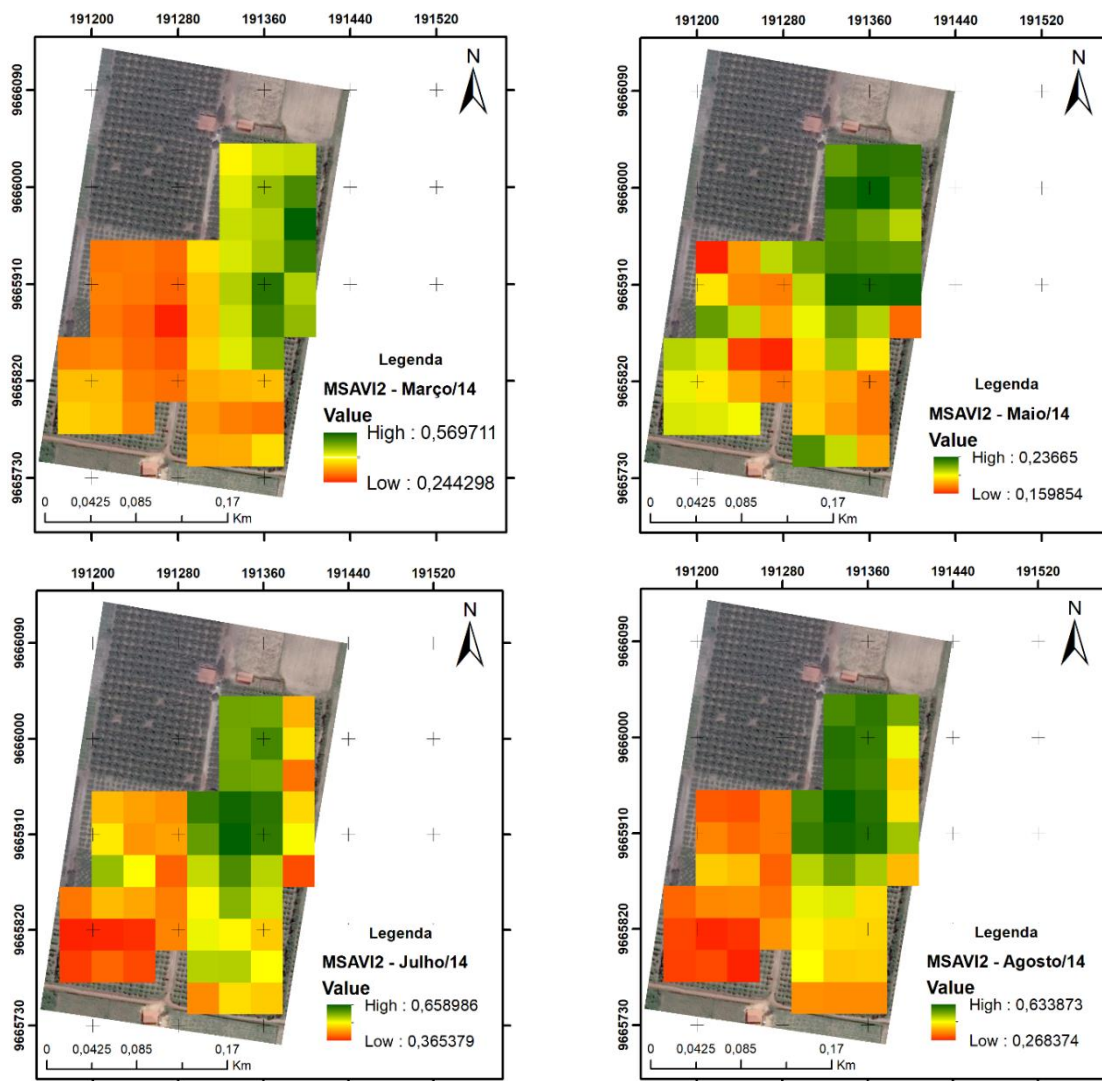


Figura 10 – Continuação...

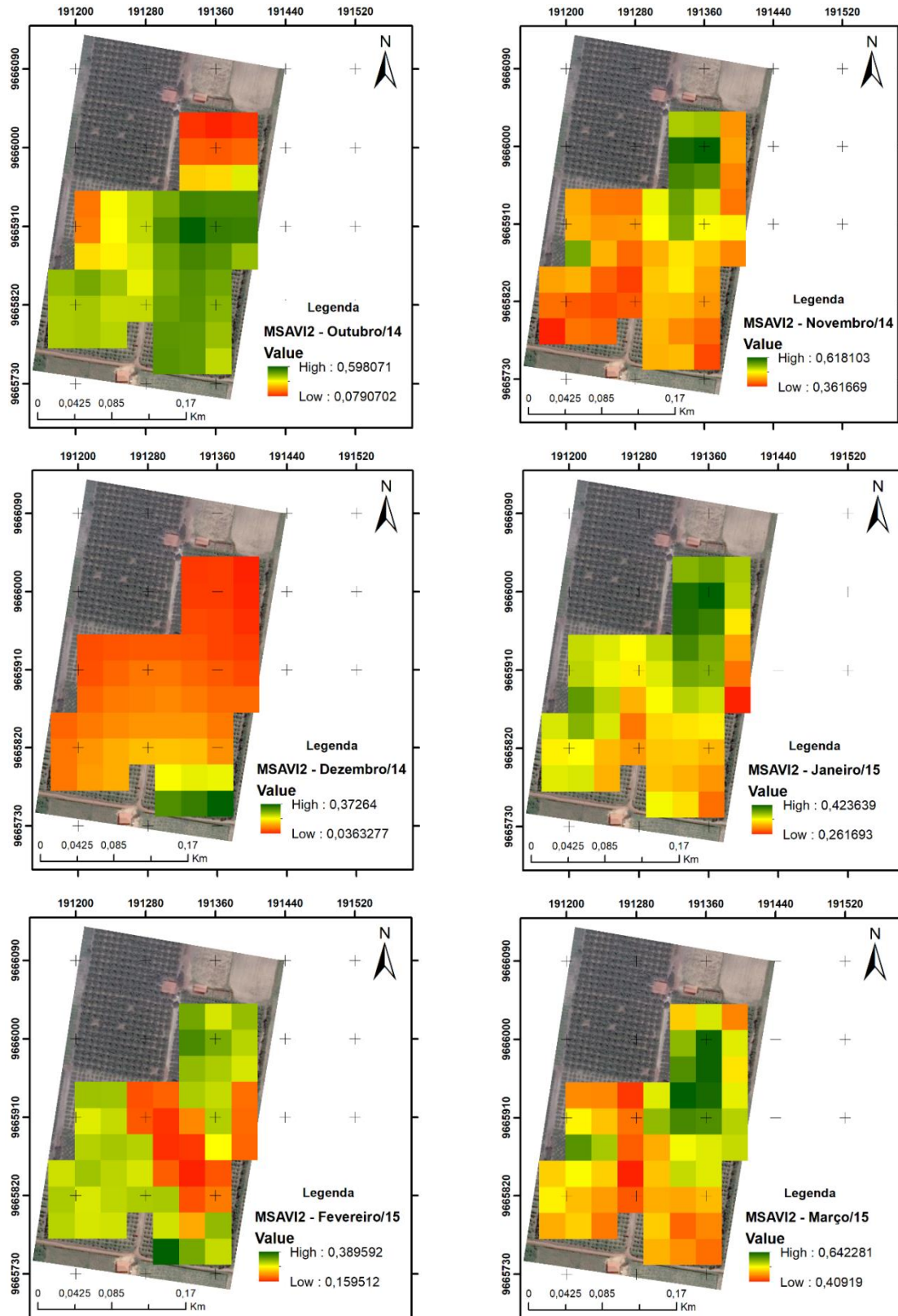


Figura 10 – Continuação...

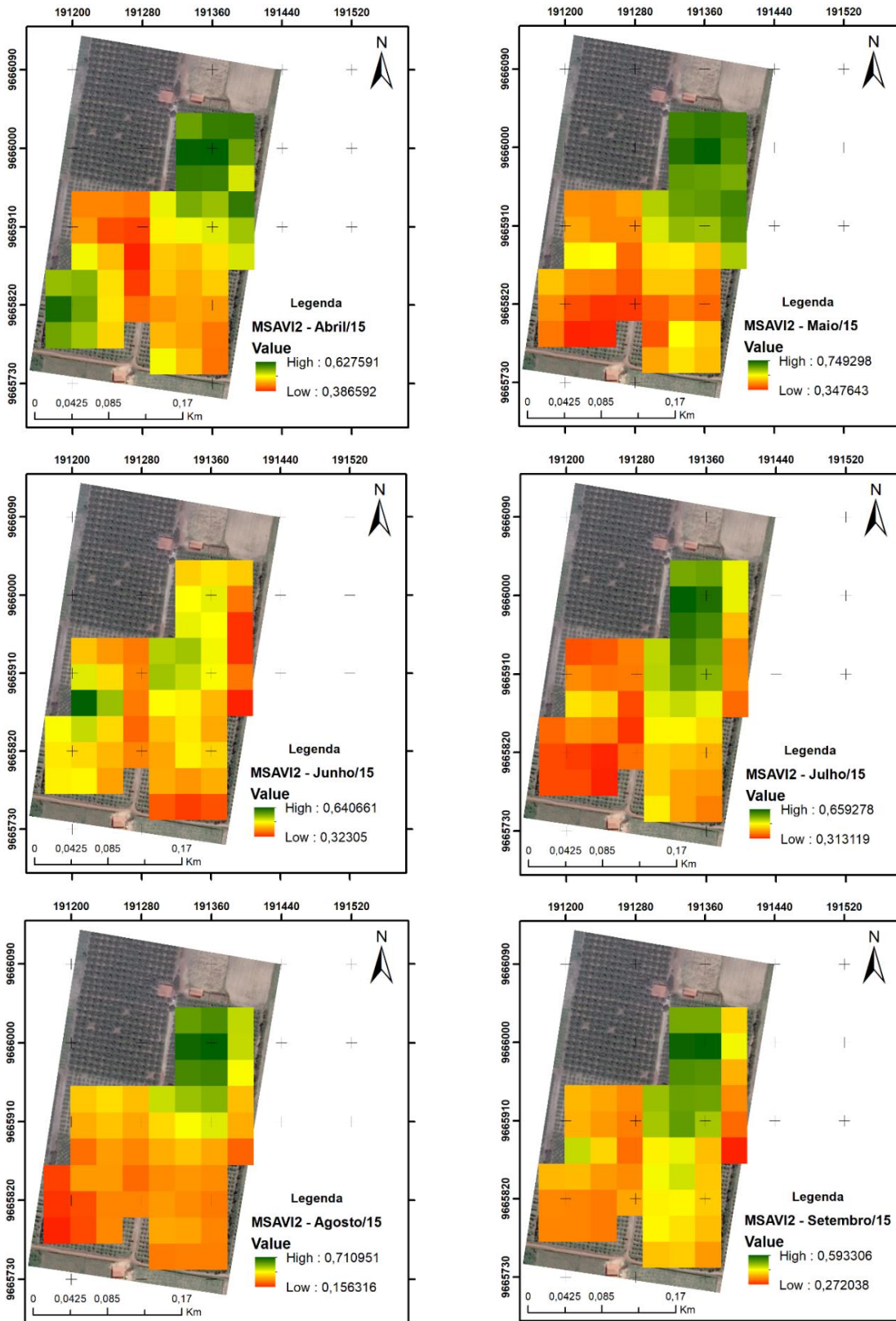


Figura 10 – Continuação...

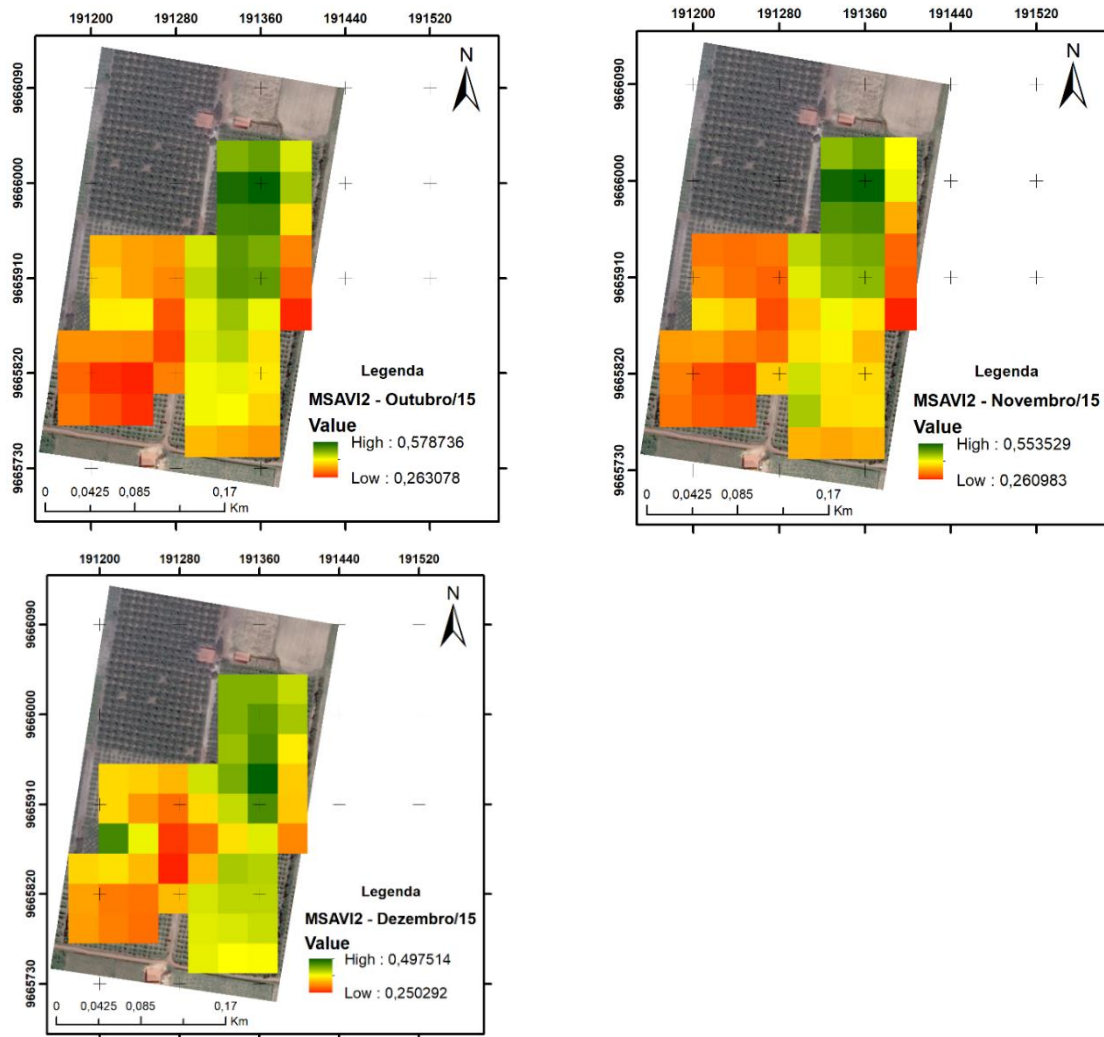


Figura 11 - MSAVI2 mensal correspondente ao Lote LP.04.E.25 do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, para os anos de 2014 e 2015.

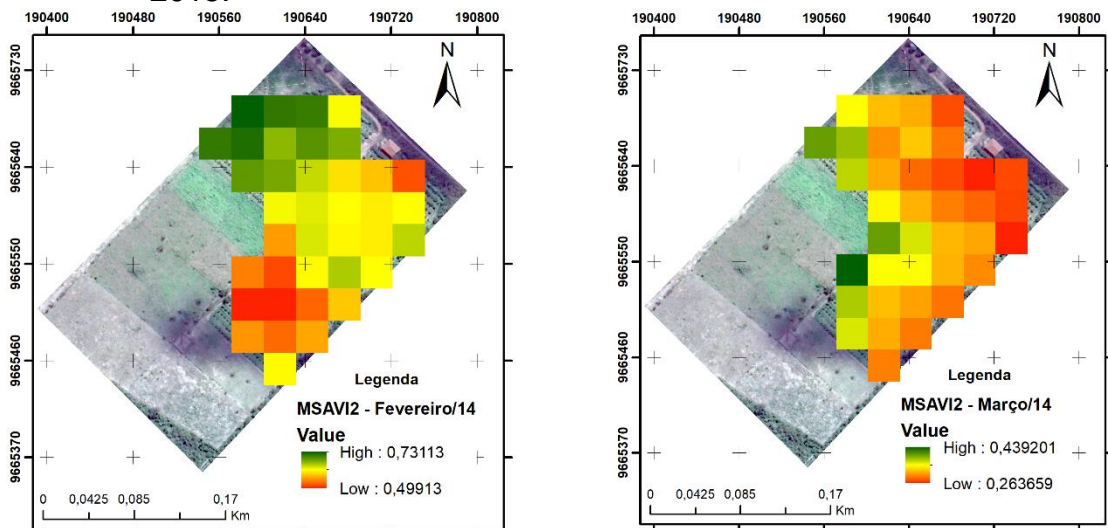


Figura 11 – Continuação...

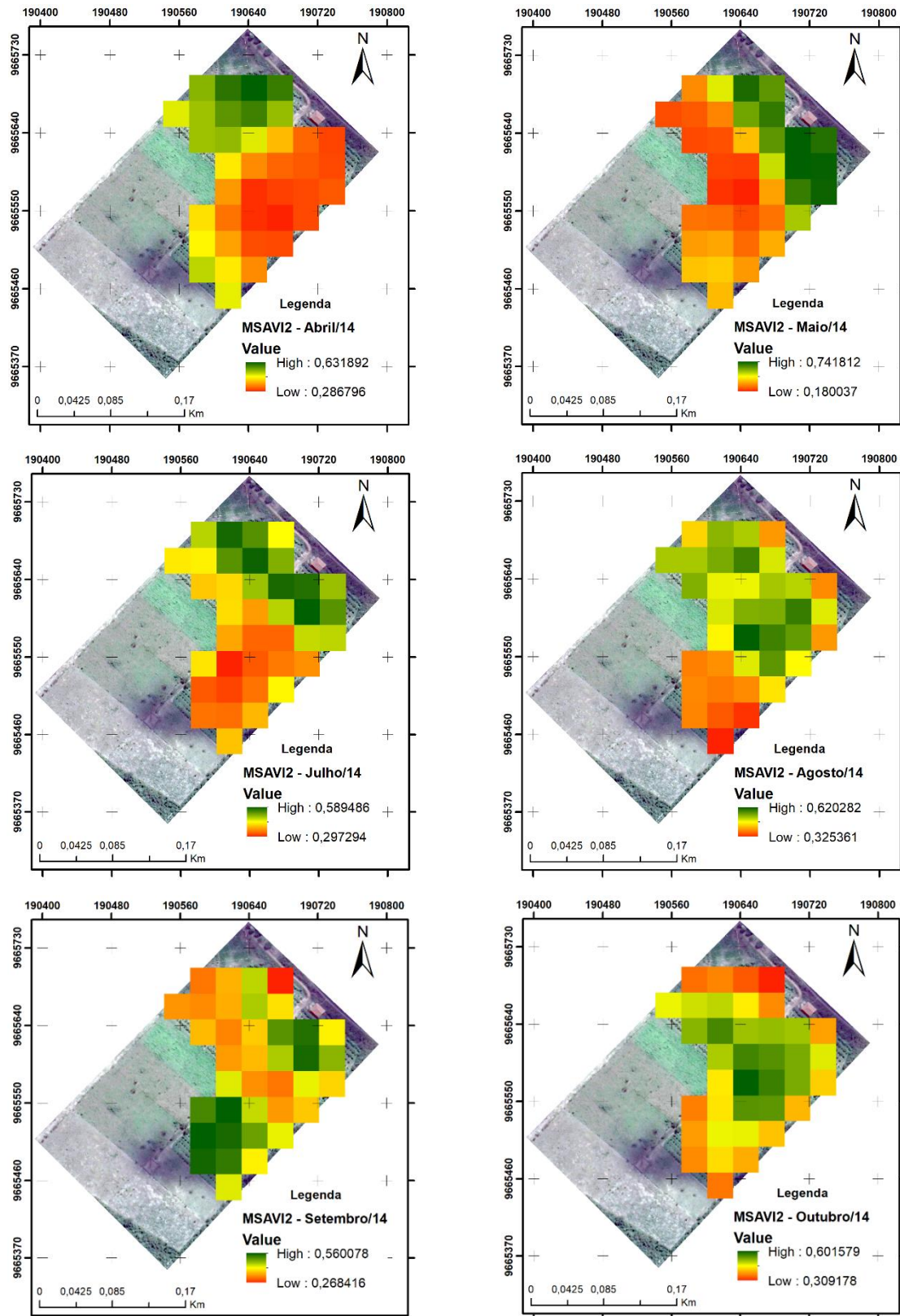


Figura 11 – Continuação...

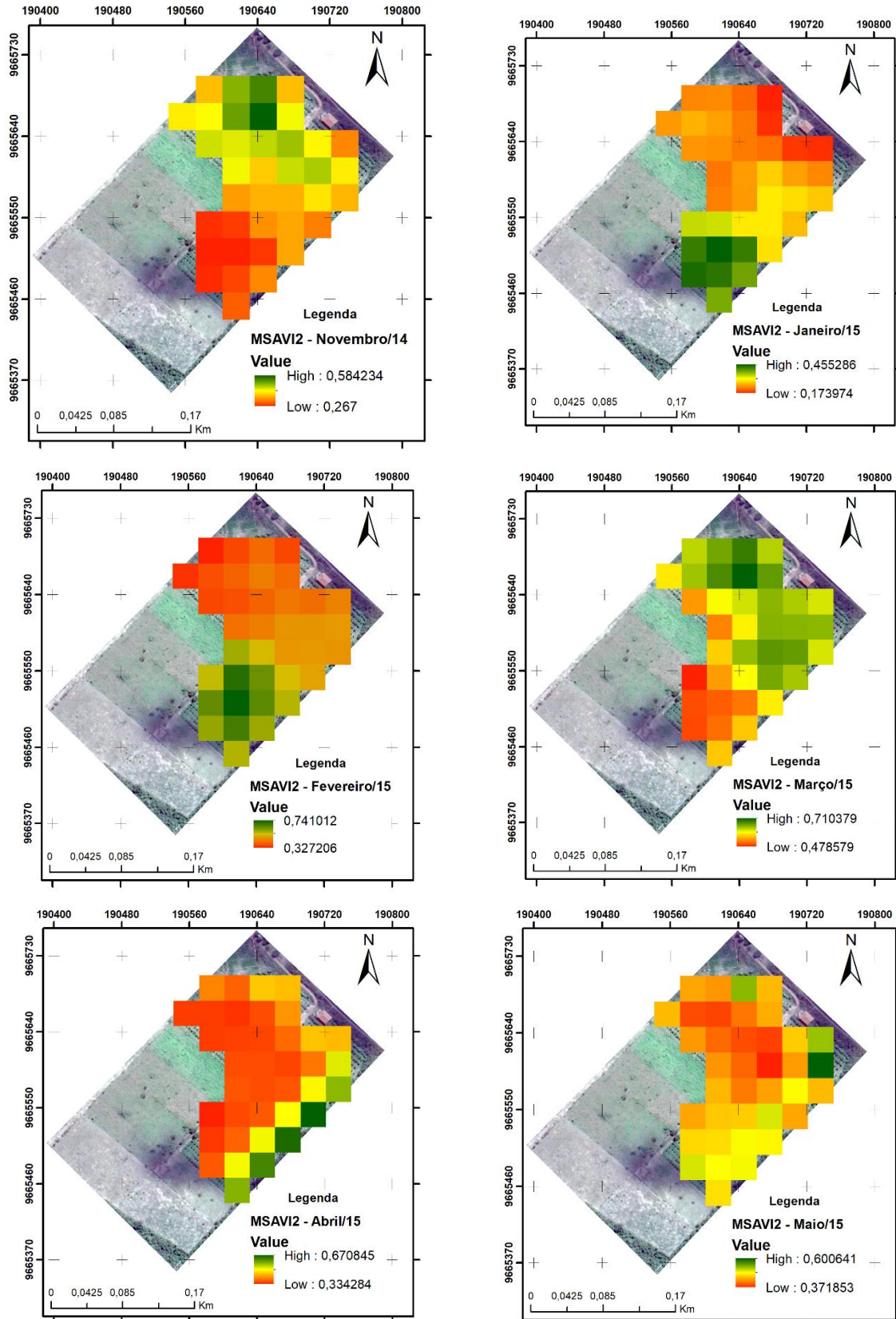


Figura 11 – Continuação...

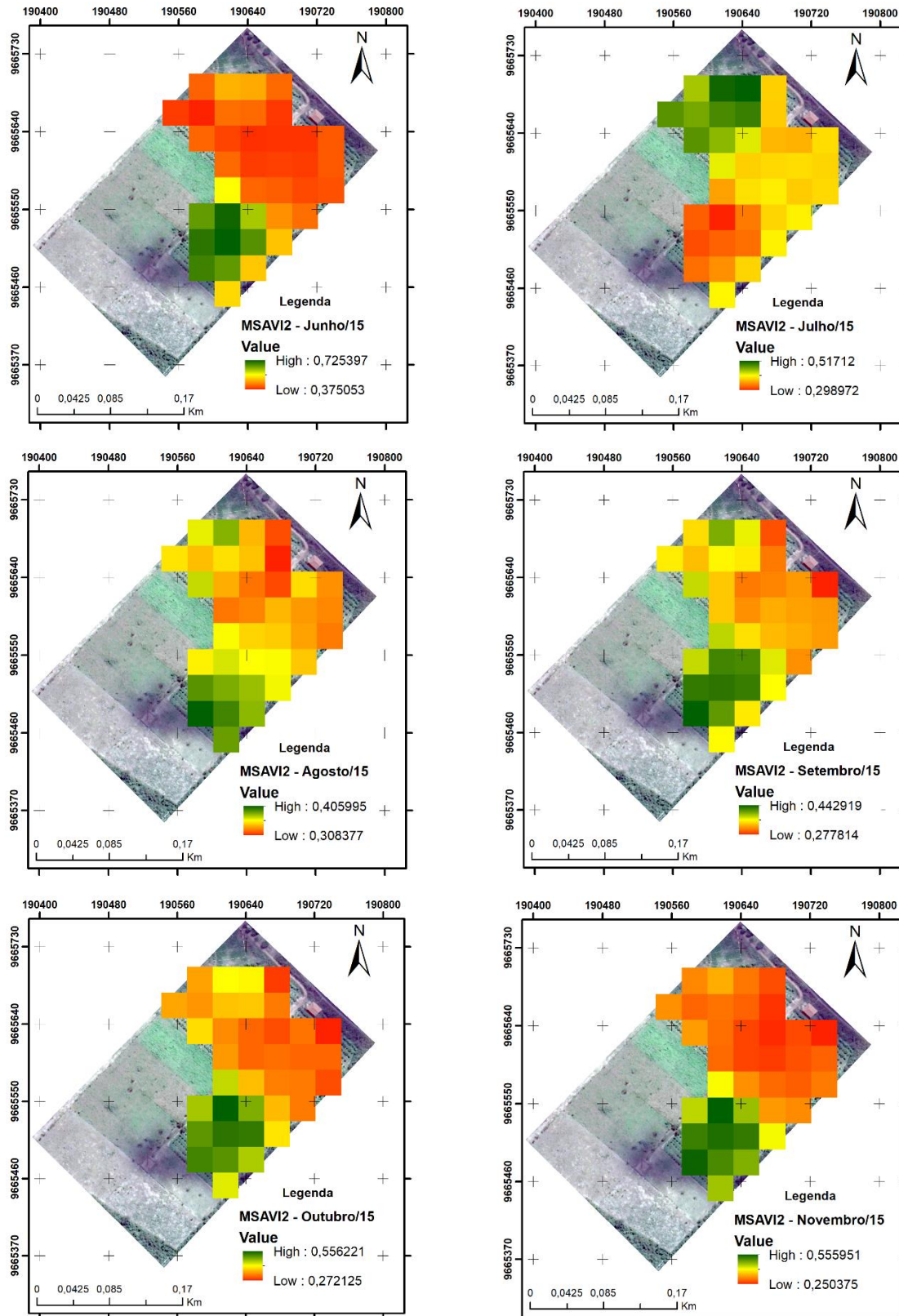


Figura 11 – Continuação...

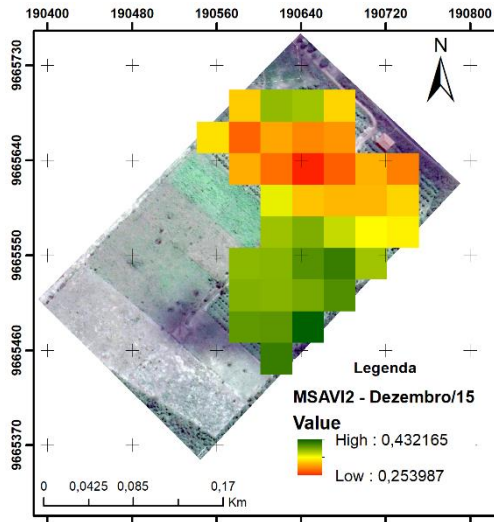


Figura 12 - MSAVI2 mensal correspondente ao Lote LP.08.50 do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, para os anos de 2014 e 2015

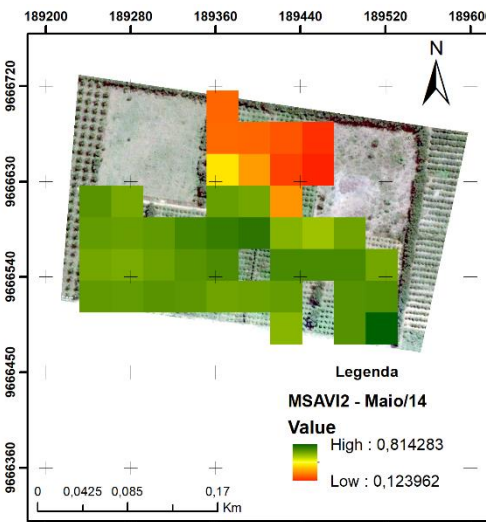
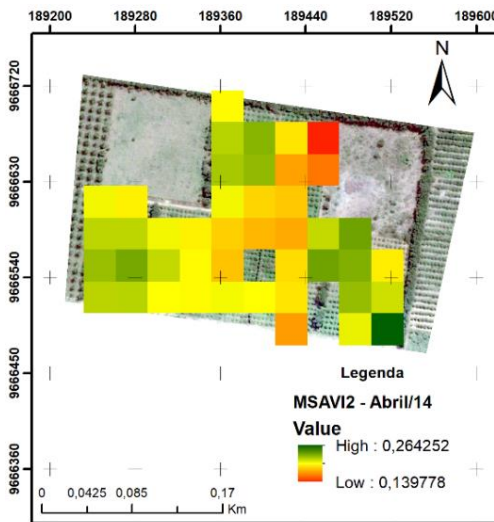
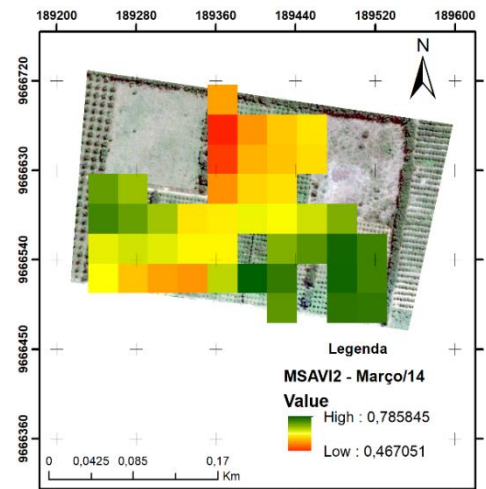
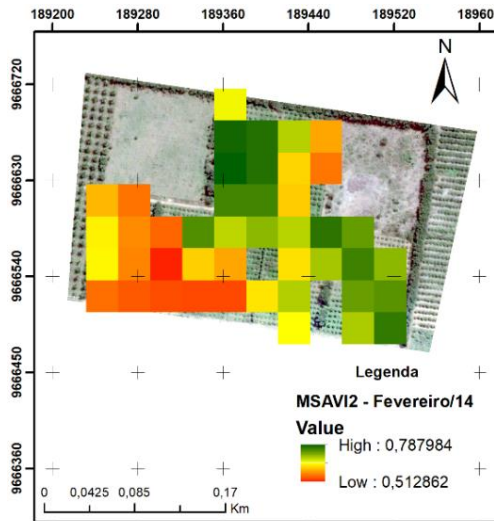


Figura 12 – Continuação...

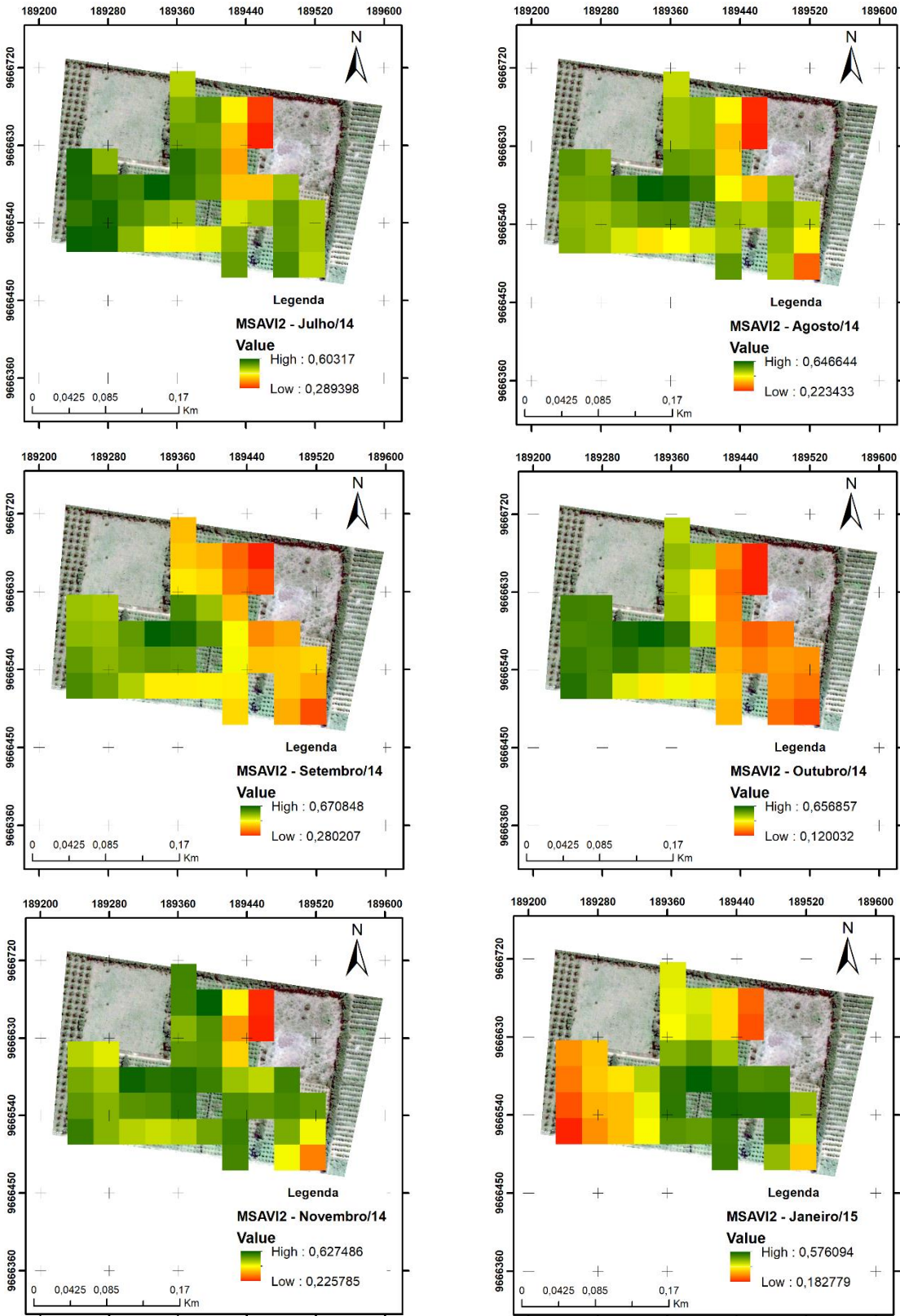


Figura 12 – Continuação...

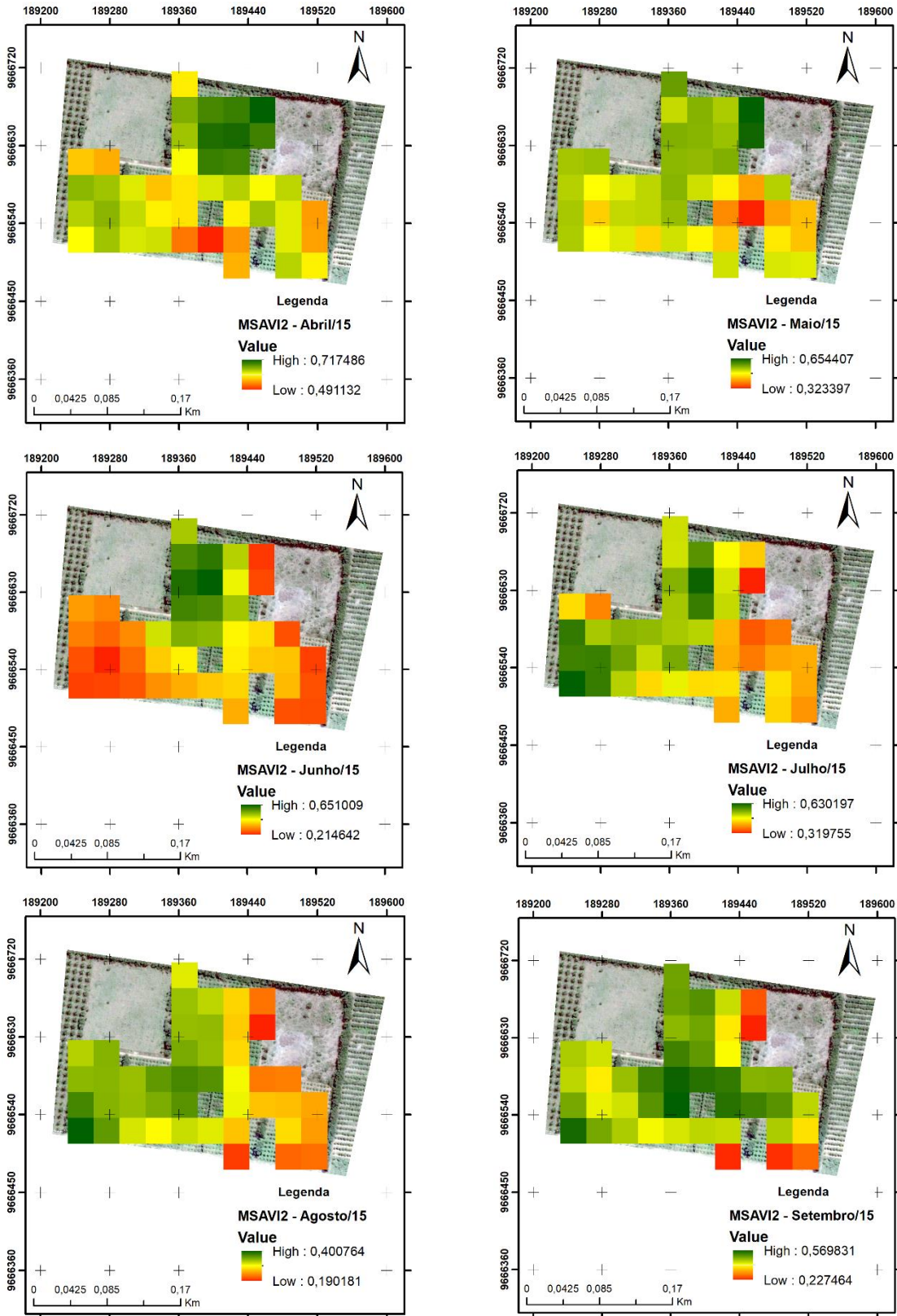


Figura 12 – Continuação...

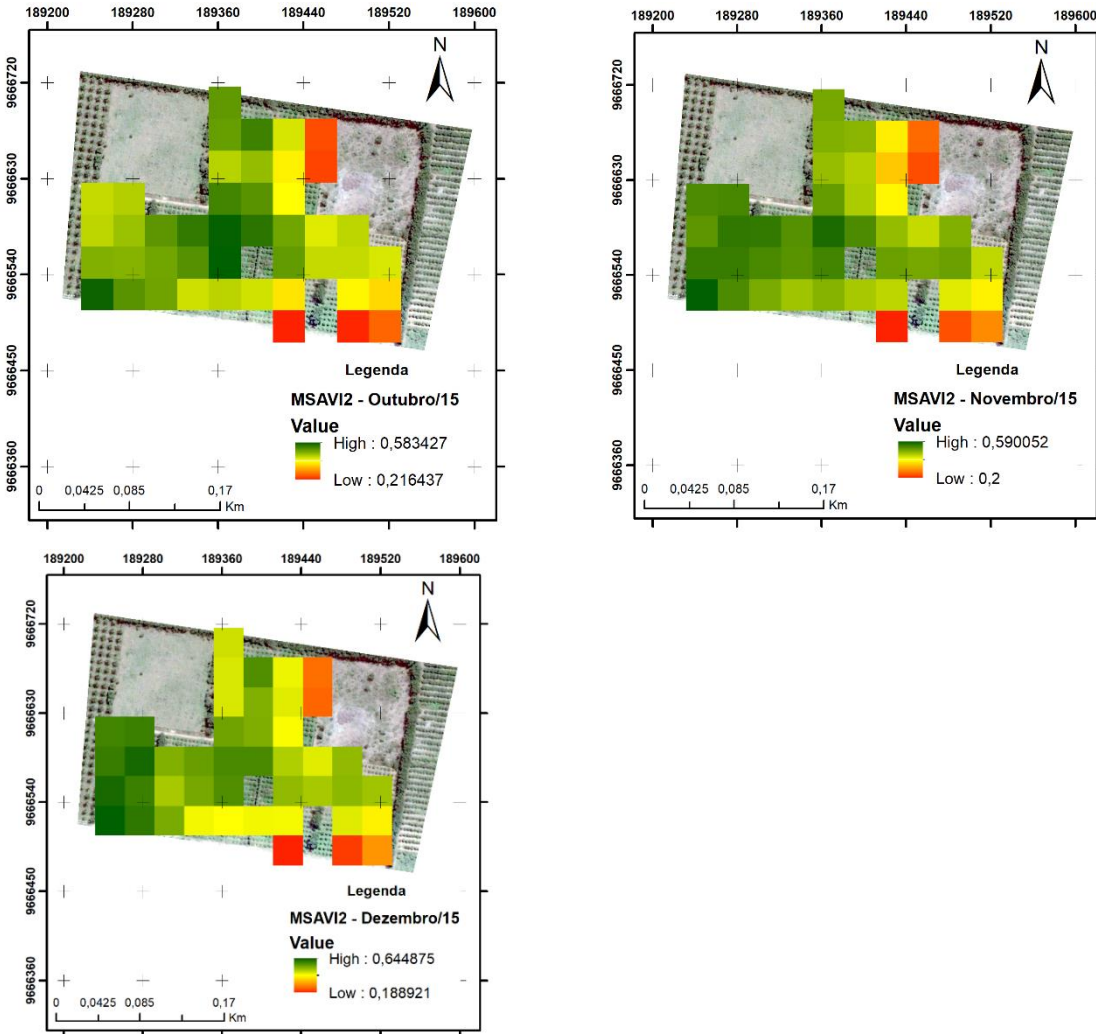


Figura 13 - MSAVI2 mensal correspondente ao Lote LP.03.D.05 do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, para os anos de 2014 e 2015

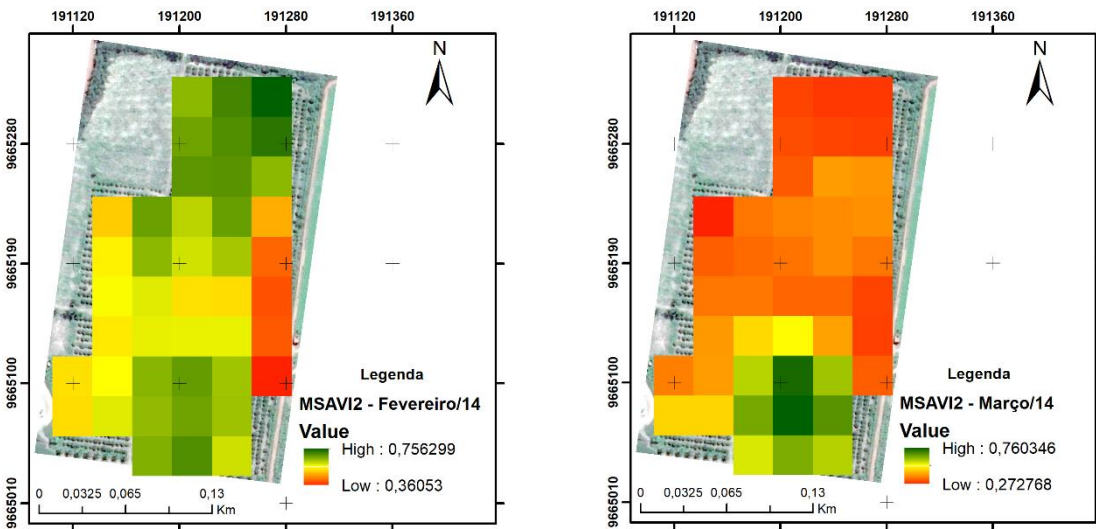


Figura 12 – Continuação...

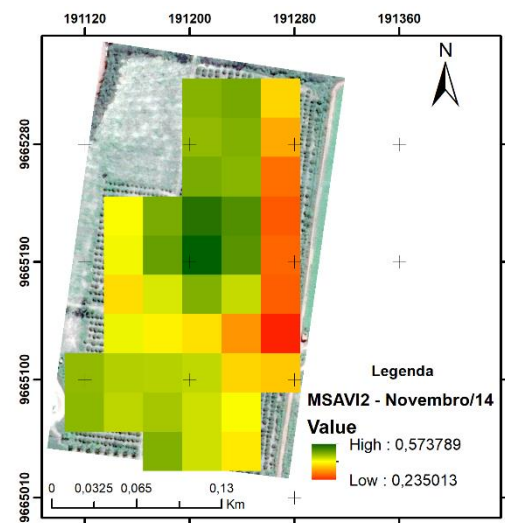
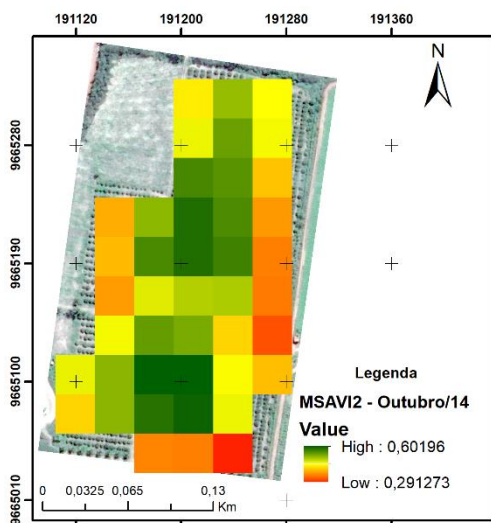
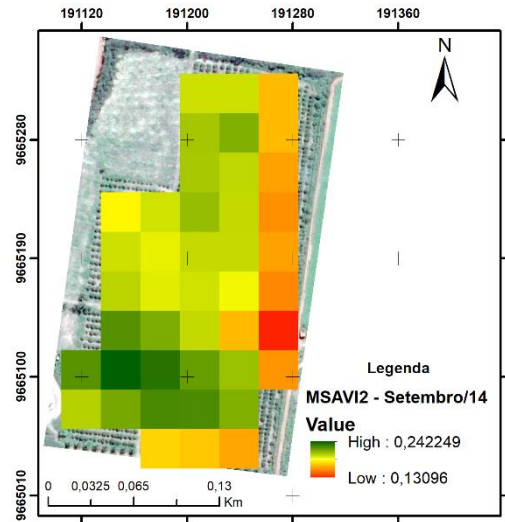
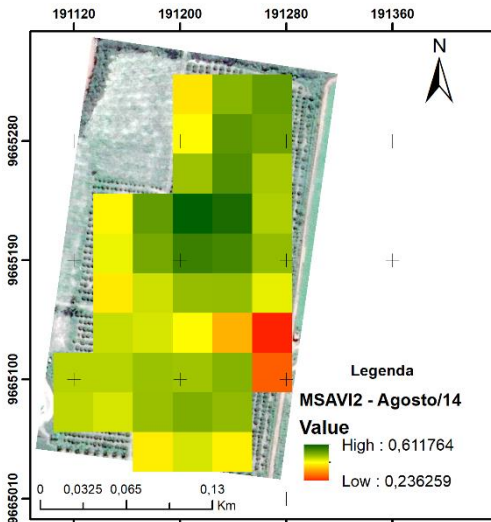
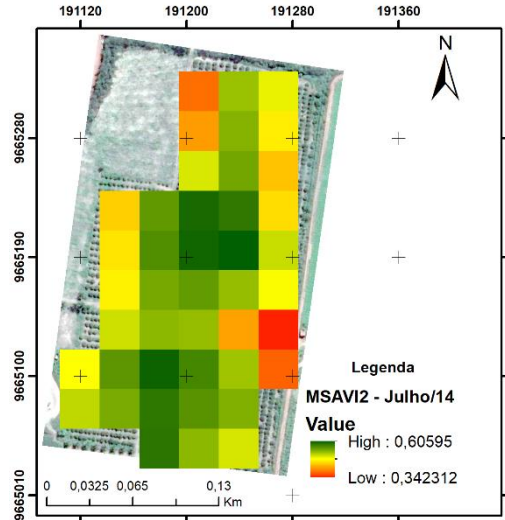
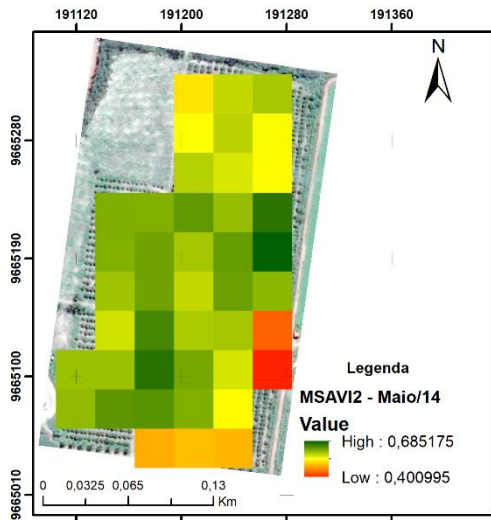


Figura 13 – Continuação...

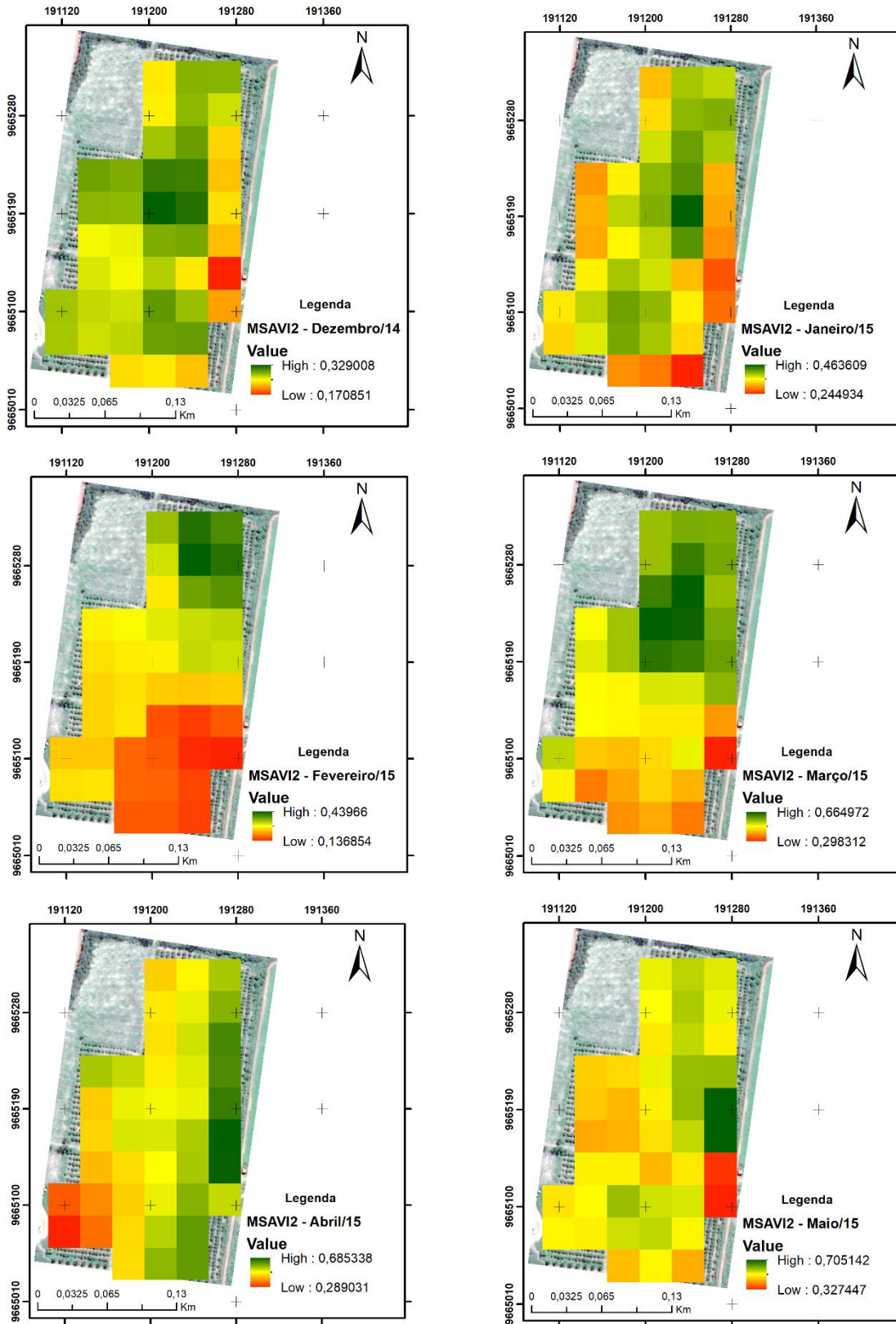


Figura 13 – Continuação...

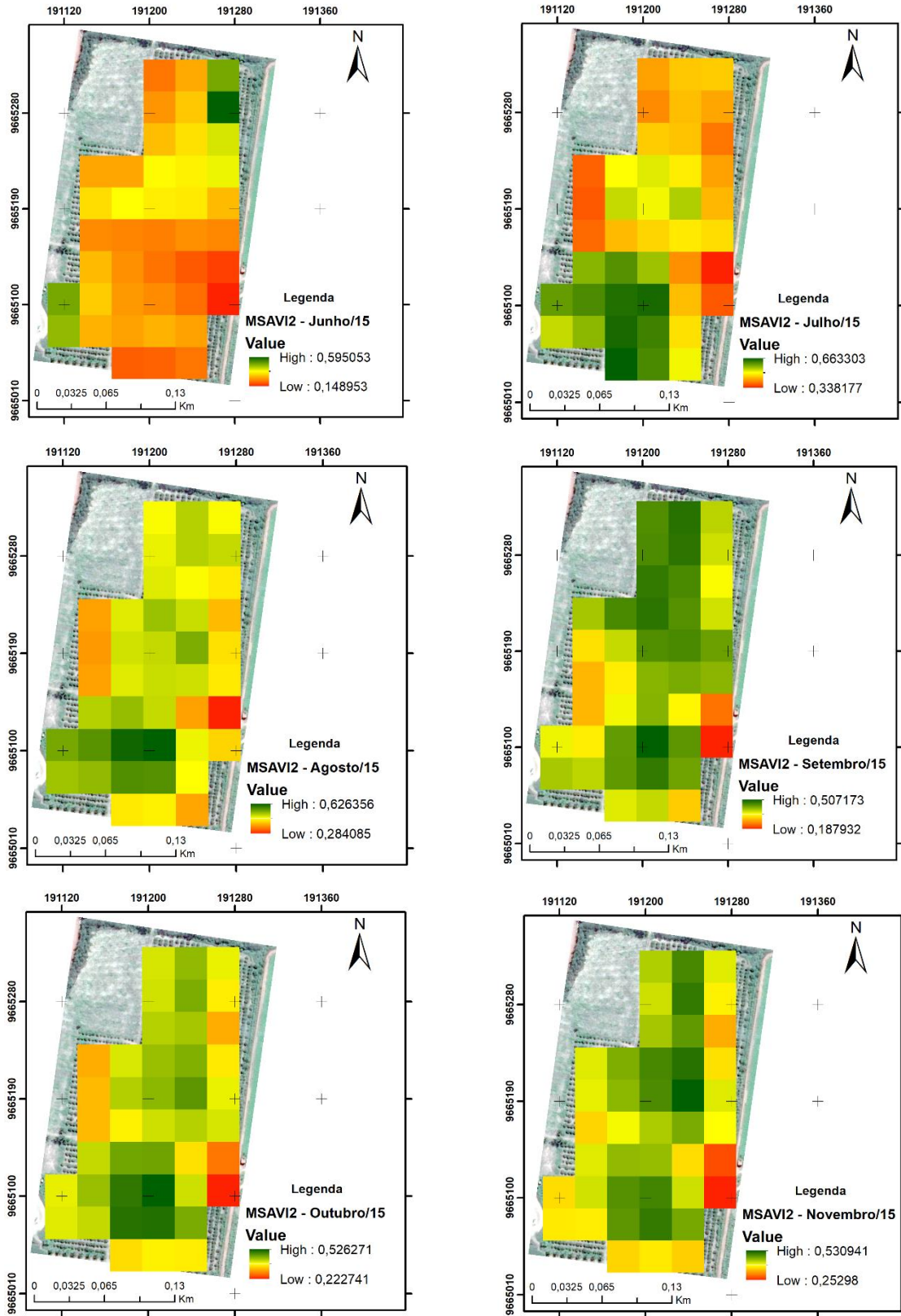


Figura 13 – Continuação...

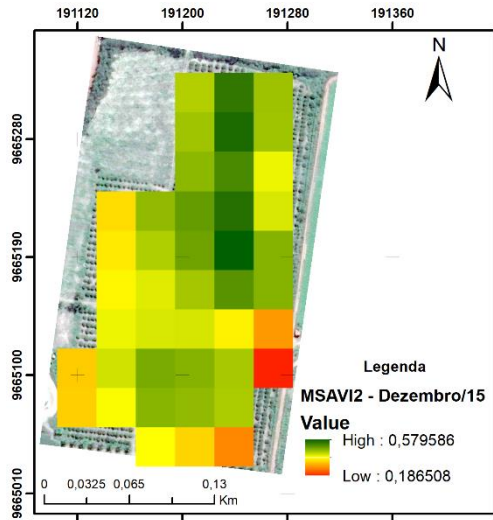


Figura 14 - MSAVI2 mensal correspondente ao Lote LP.08.67 do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, para os anos de 2014 e 2015

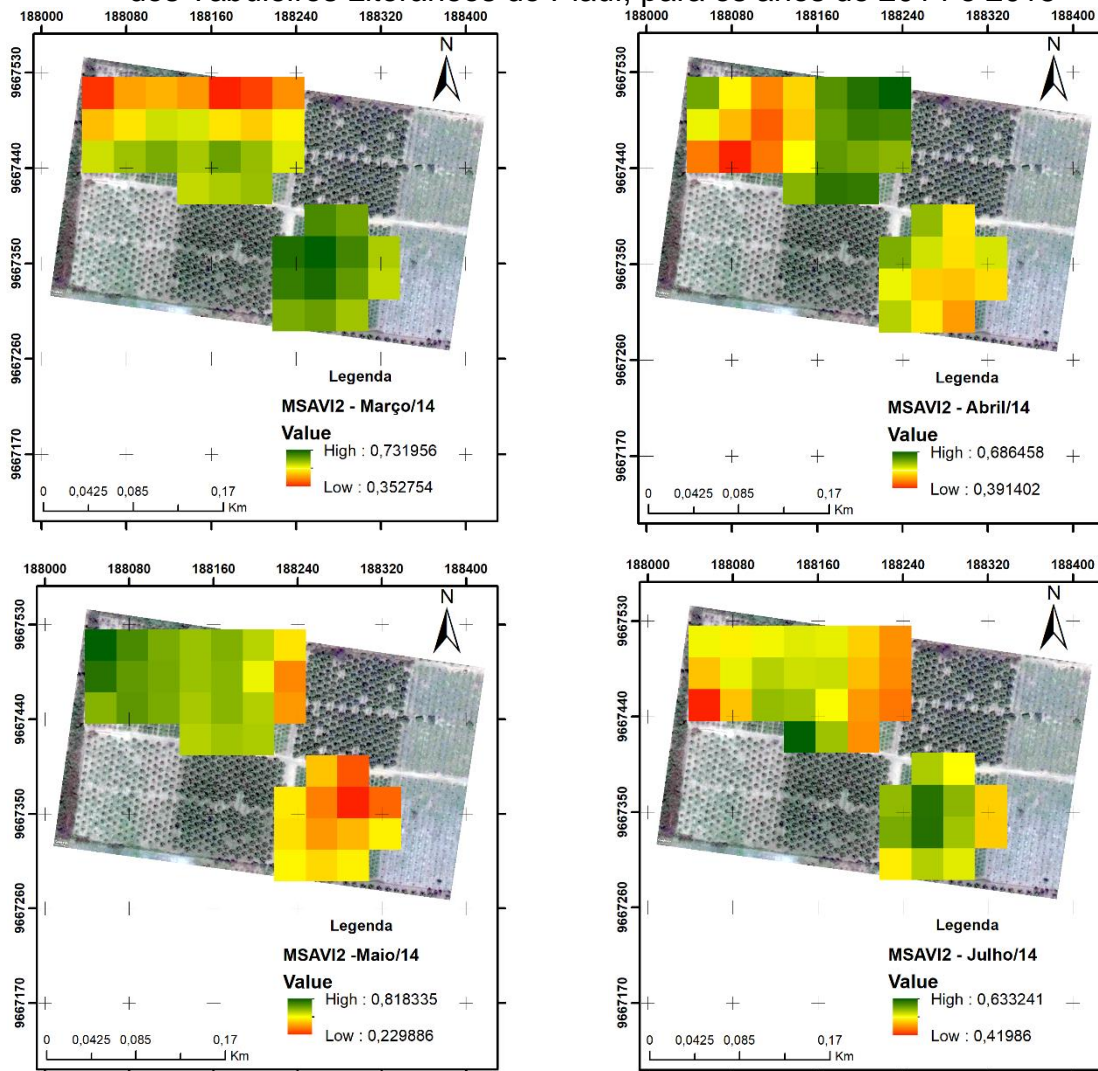


Figura 14 – Continuação...

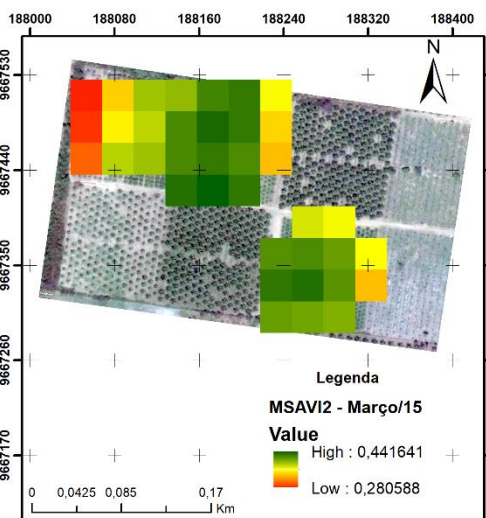
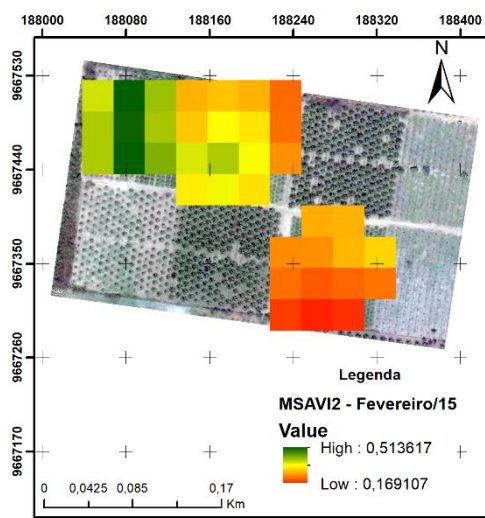
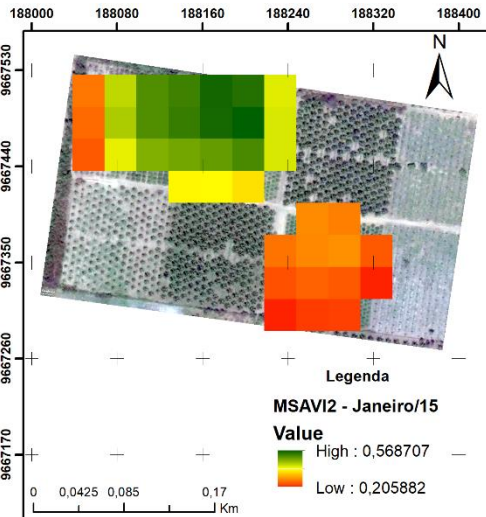
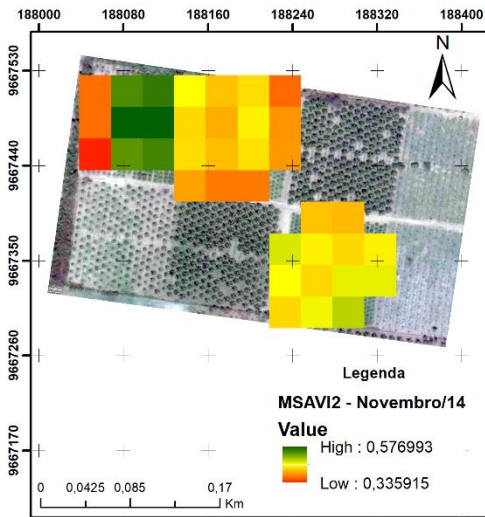
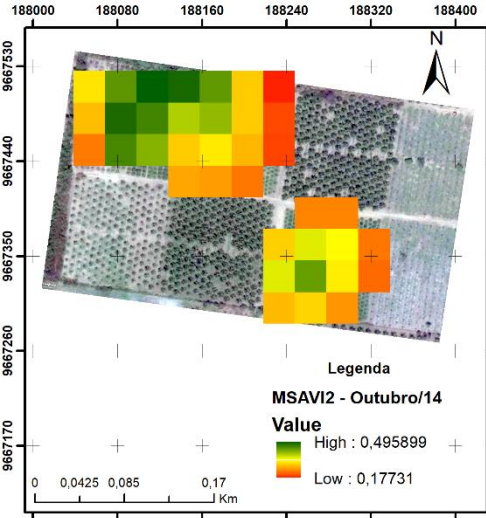
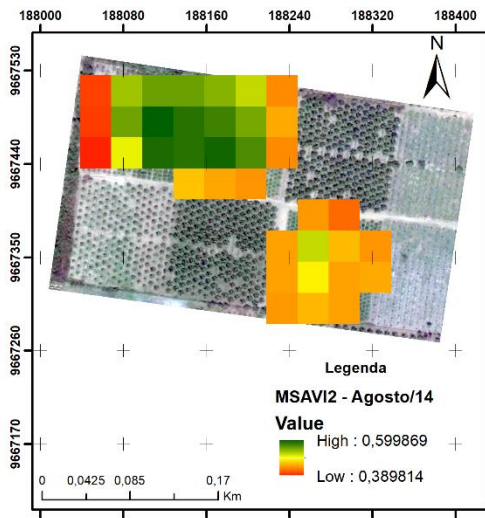


Figura 14 – Continuação...

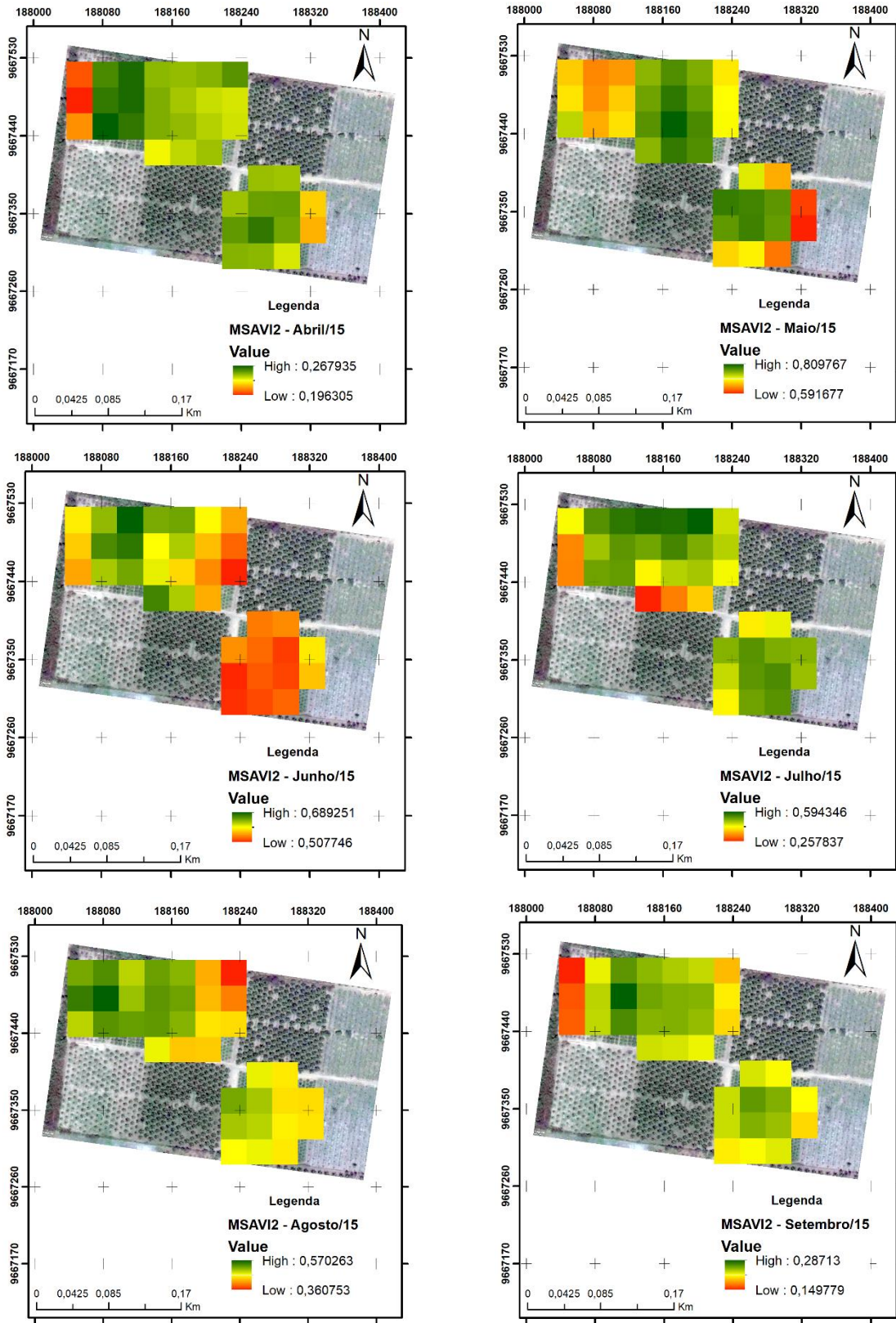


Figura 14 – Continuação...

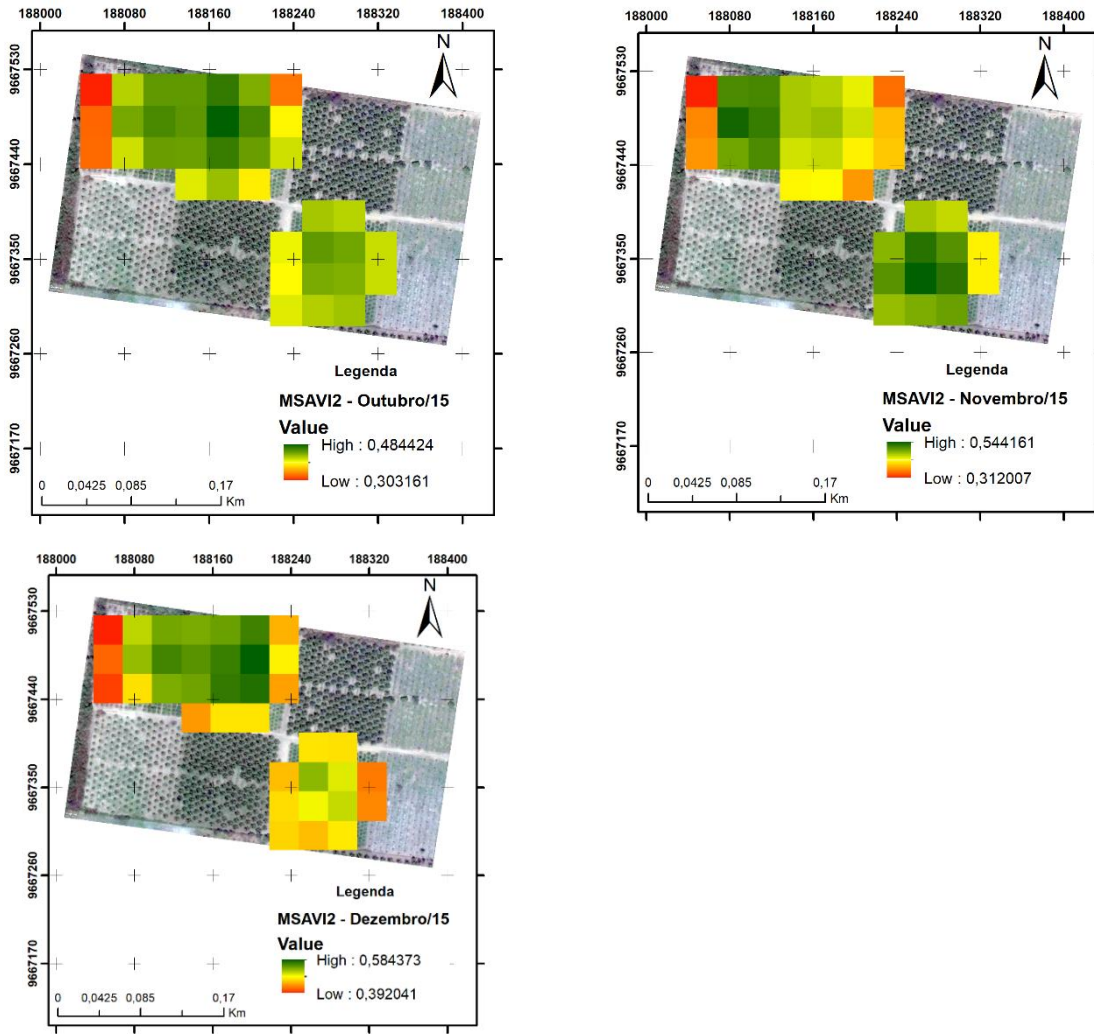


Figura 15 - MSAVI2 mensal correspondente ao Lote LP.04.D.24 do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, para os anos de 2014 e 2015

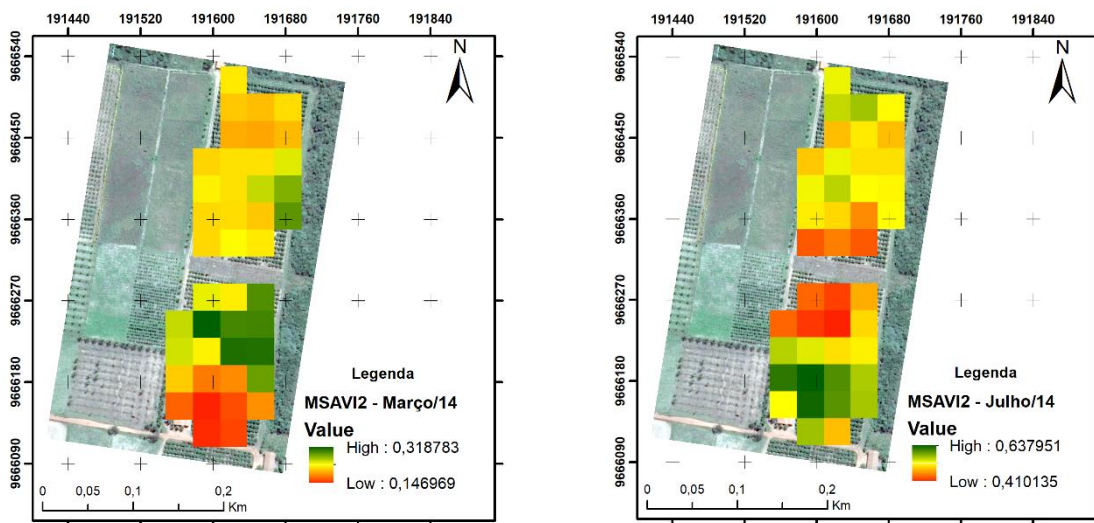


Figura 15 – Continuação...

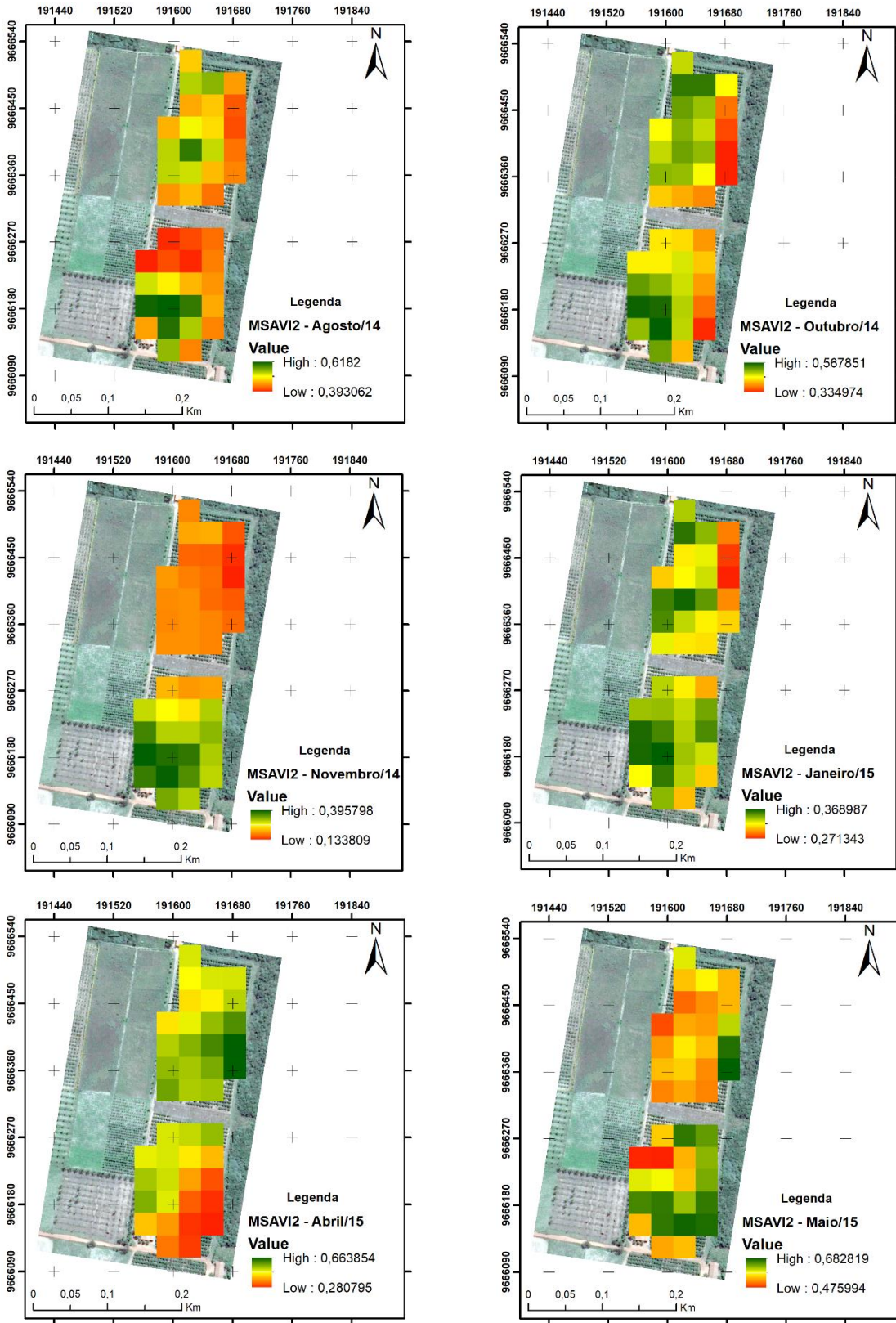


Figura 15 – Continuação...

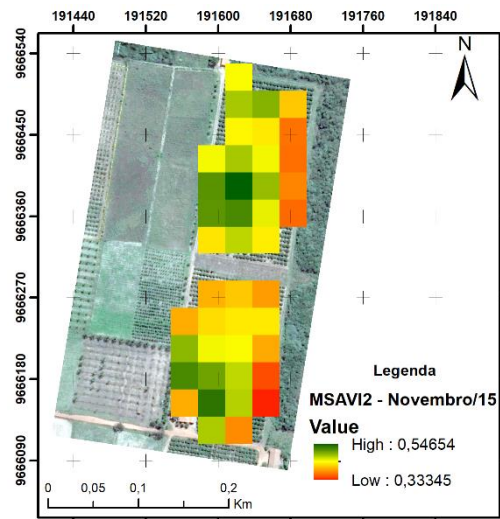
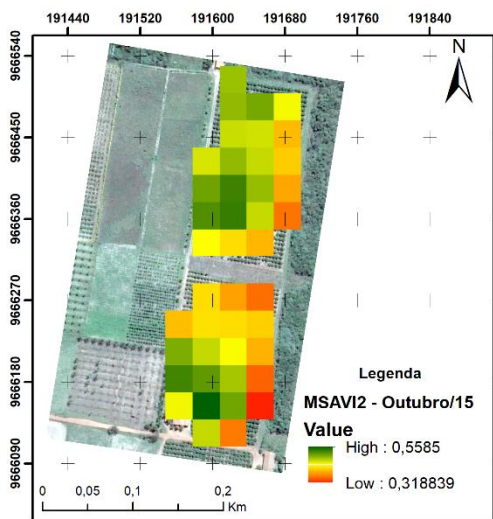
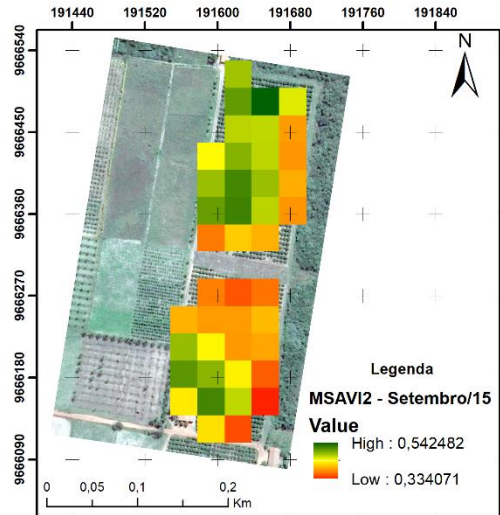
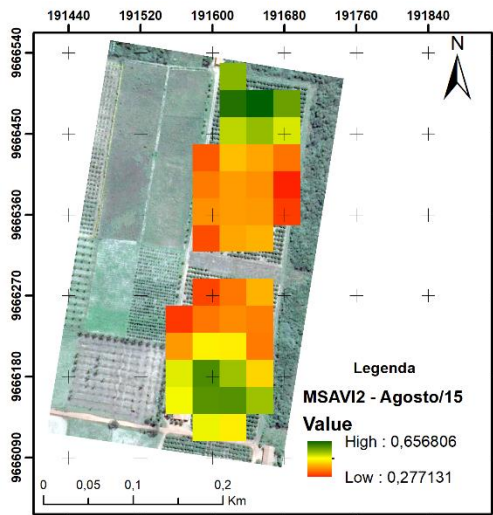
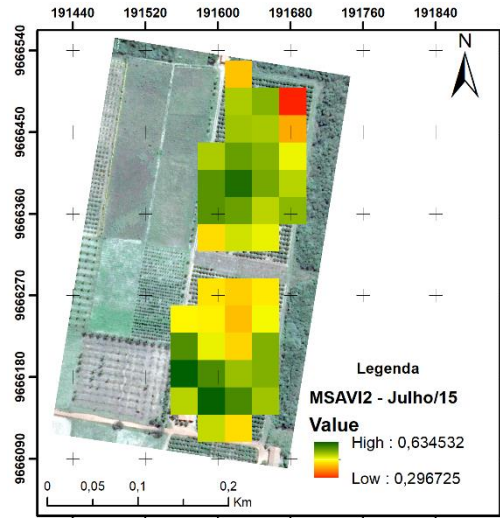
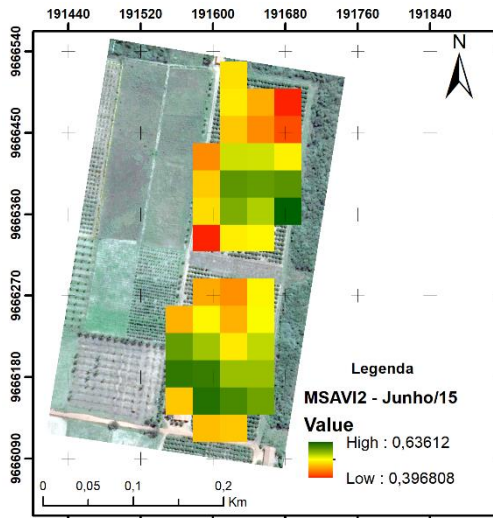


Figura 15 – Continuação...

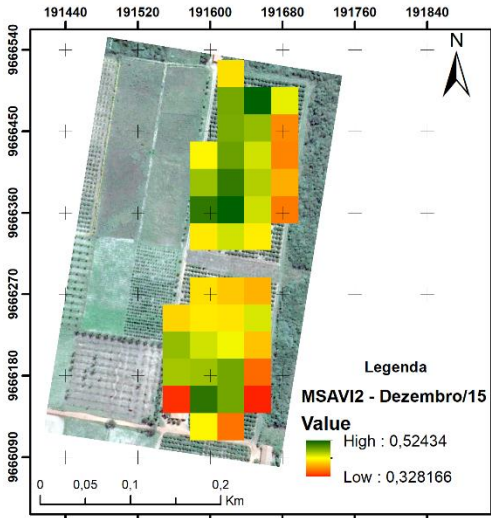


Figura 16 - MSAVI2 mensal correspondente ao Lote LP.04.E.26/27 do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, para os anos de 2014 e 2015.

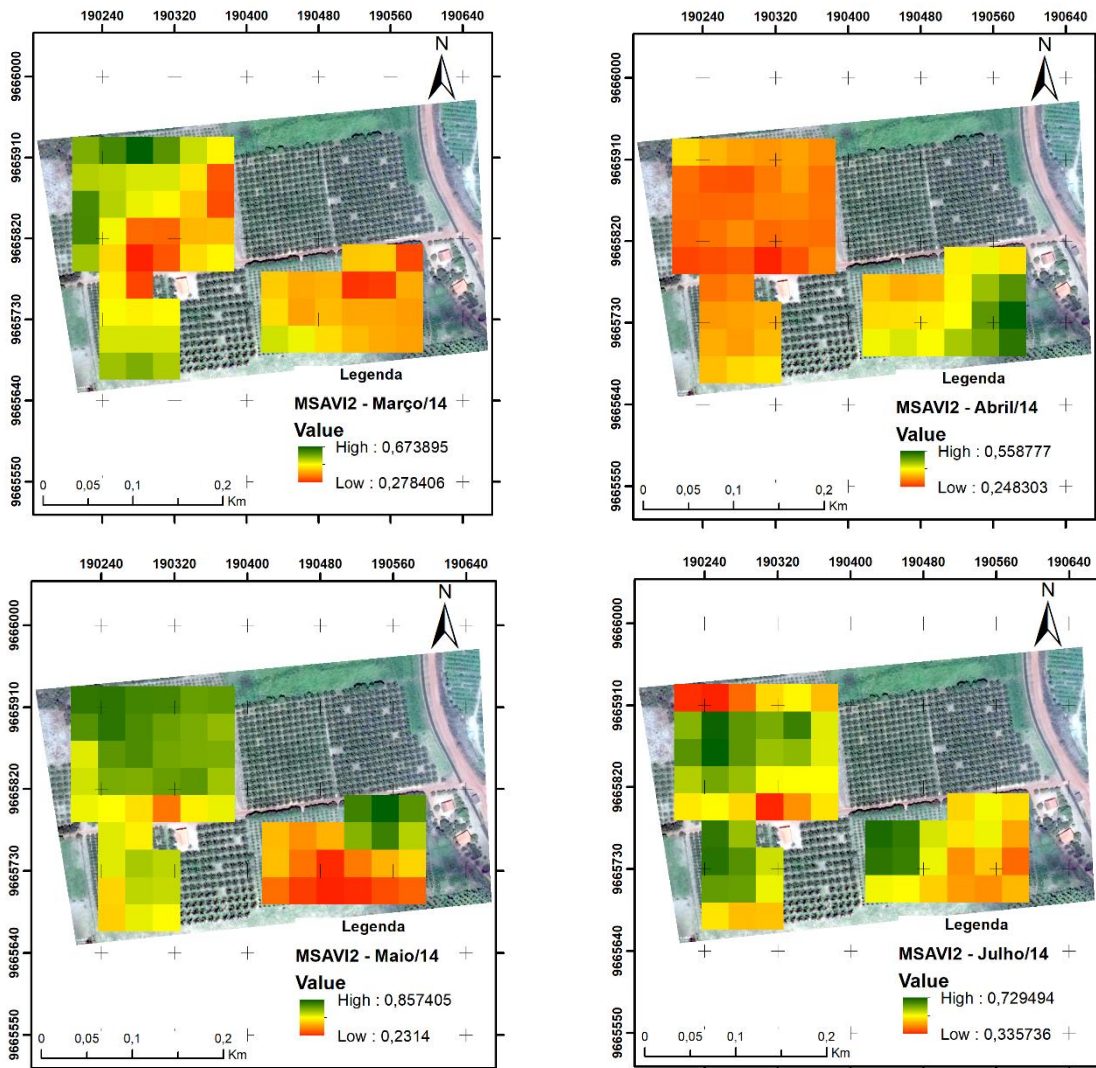


Figura 16 – Continuação...

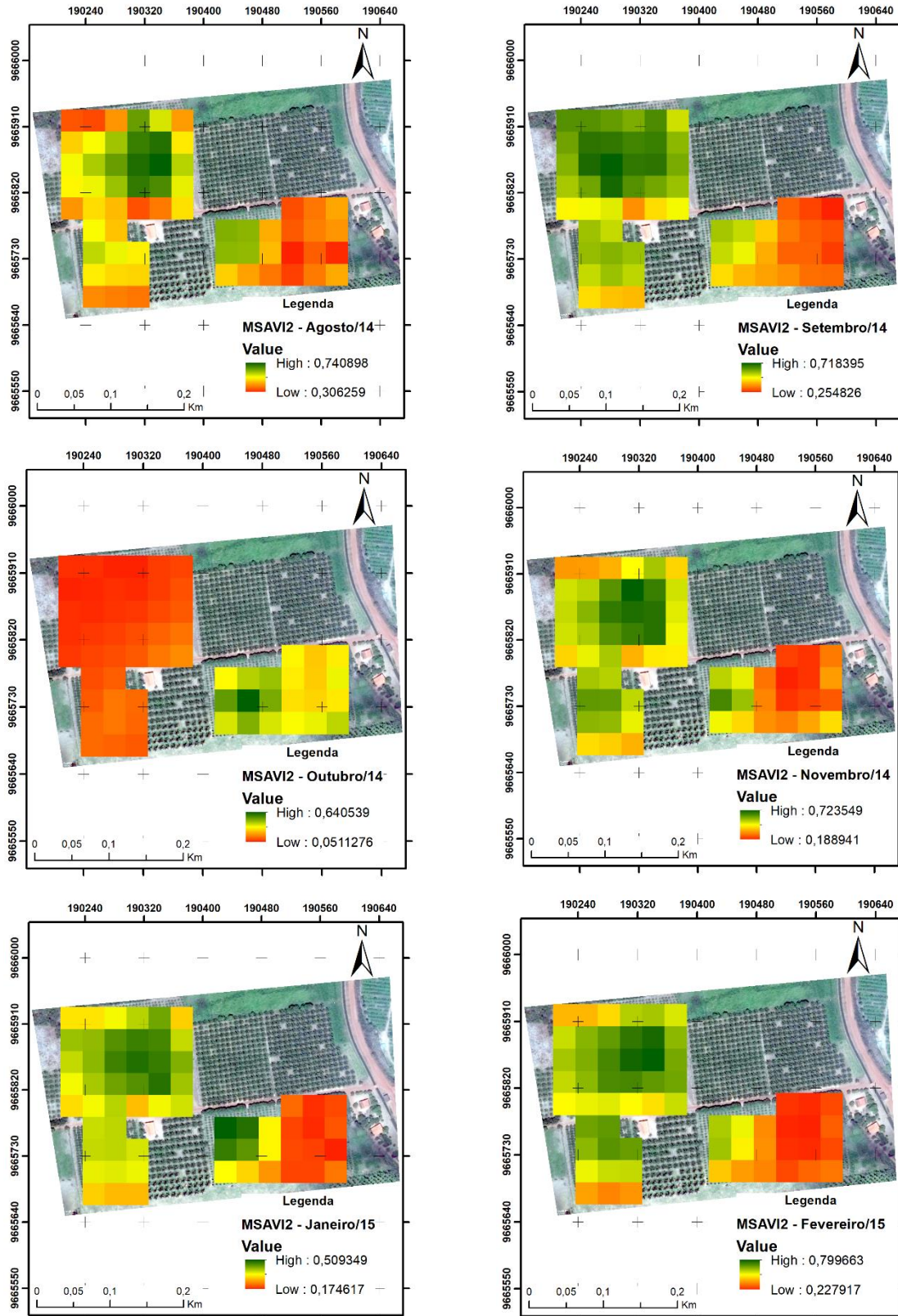


Figura 16 – Continuação...

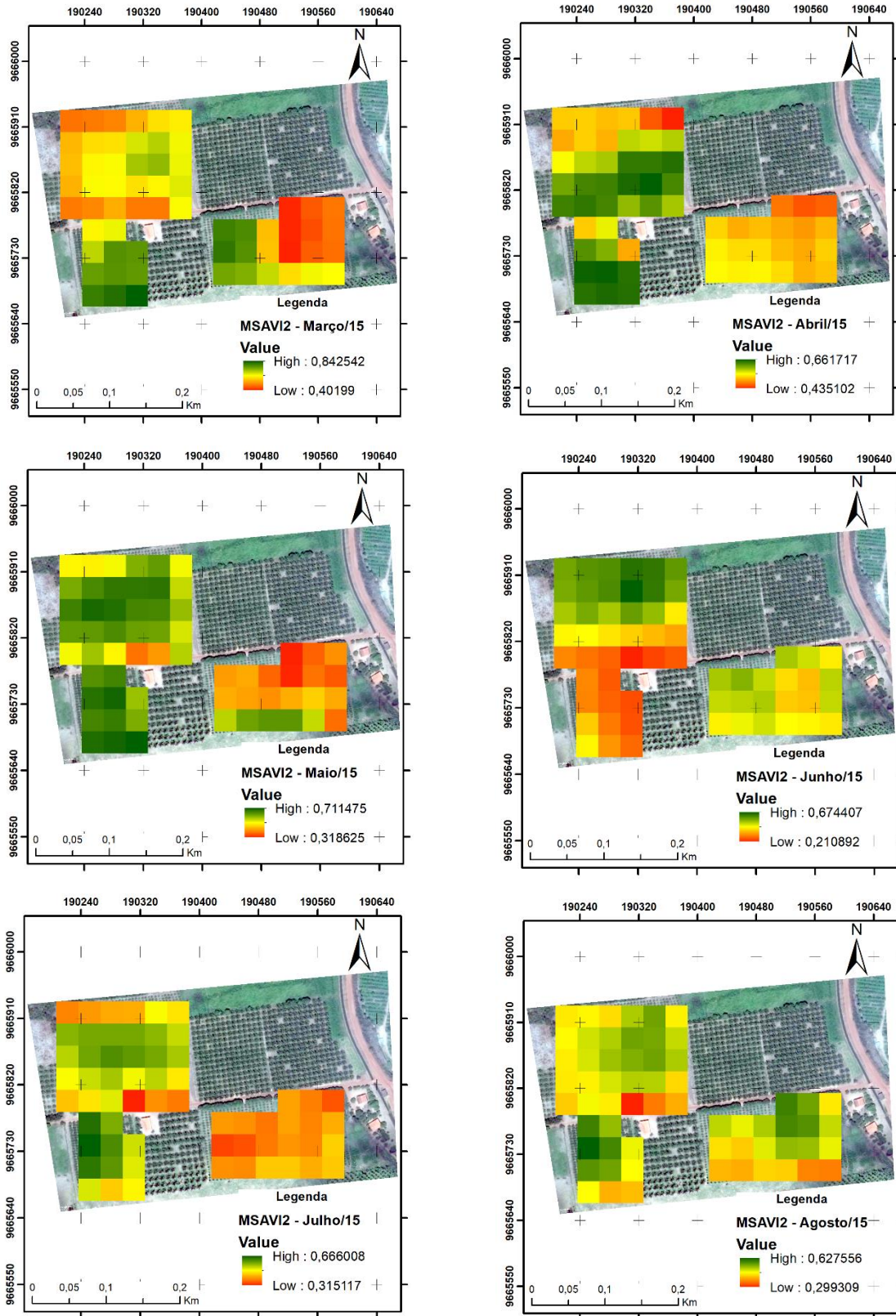
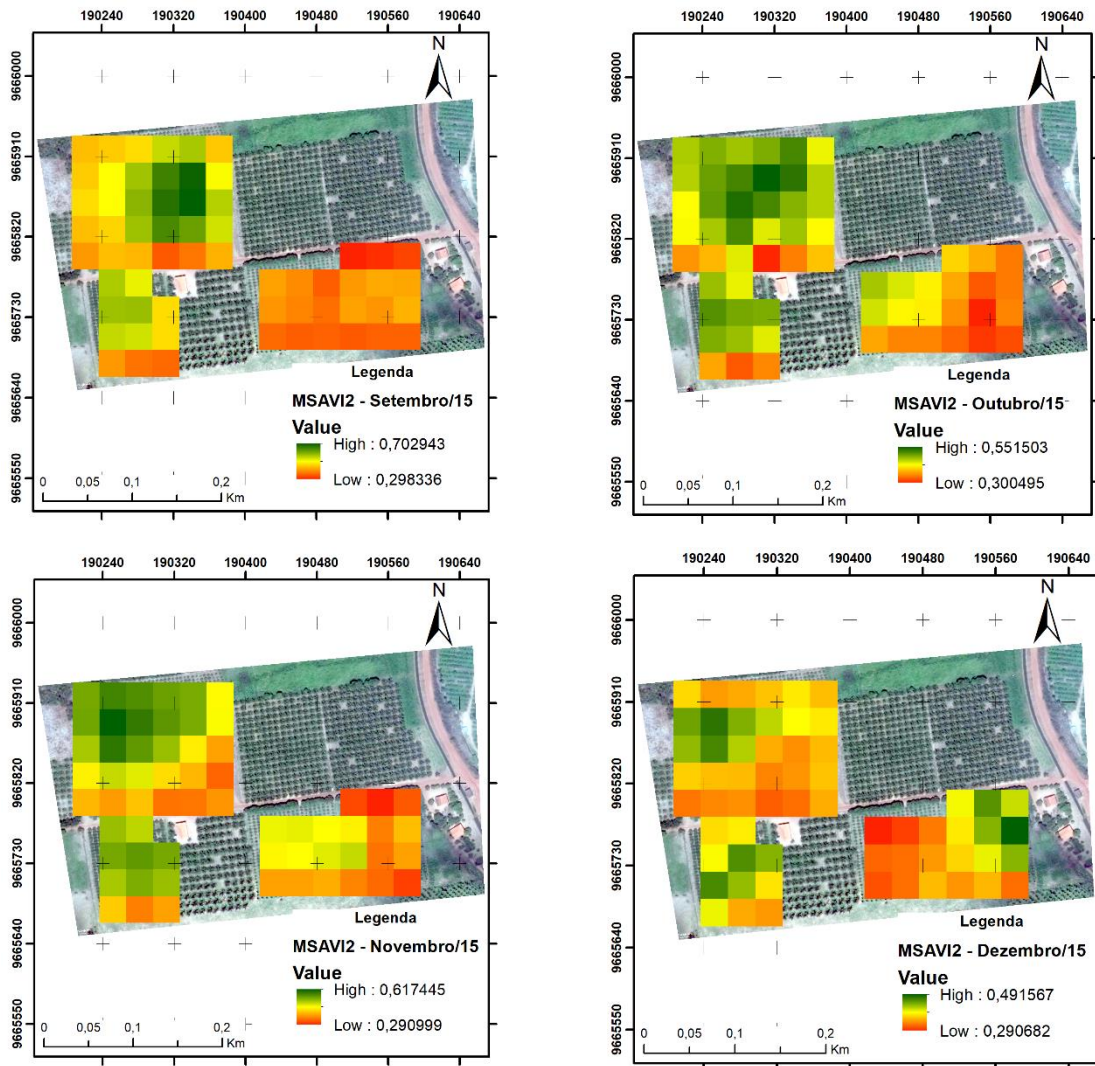


Figura 16 – Continuação...



4.5 Coeficiente da Cultura por Sensoriamento Remoto

Os registros dos $K_{C_{MSAVI2}}$ que foram obtidos por meio das relações entre a F_c , o K_c (estimado pelos métodos convencionais) segundo Calgaro e Braga (2012) e $MSAVI_2$ são apresentados nas Figuras 17 e 18. Estes valores foram calculados pela Equação 5, já exposta anteriormente.

Neste trabalho não se considerou definir os estádios vegetativos da aceroleira com relação ao K_c , pois durante as épocas de coletas de dados, a cultura já se encontrava em estágio adulto. Então escalonou-se o $K_{C_{MSAVI2}}$ de janeiro a março (época de chuva); abril a julho e agosto a dezembro (épocas de seca e poda).

Figura 17 - Valores médios de $K_{C_{MSAVI2}}$ calculados por sensoriamento remoto para 2014, referenciados a sete lotes do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí - DITALPI

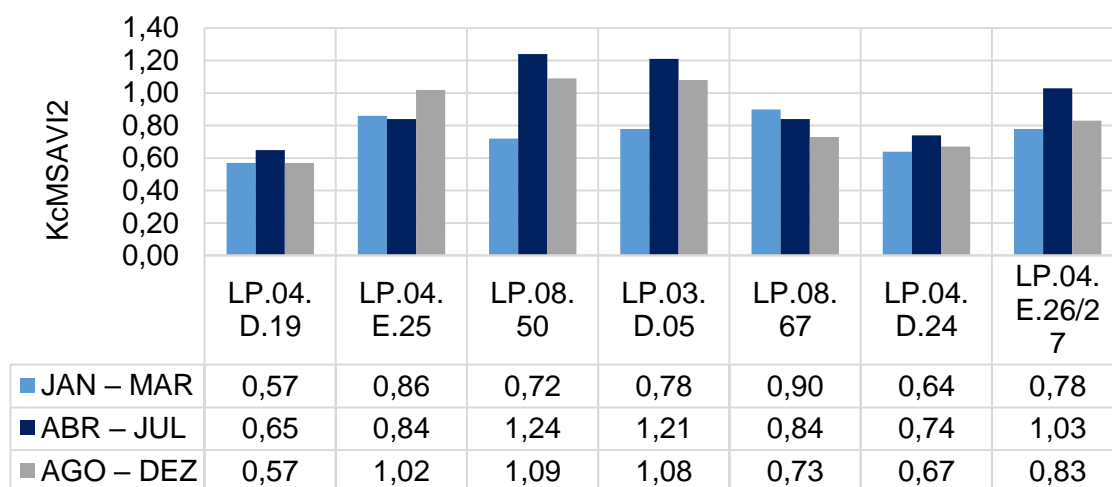
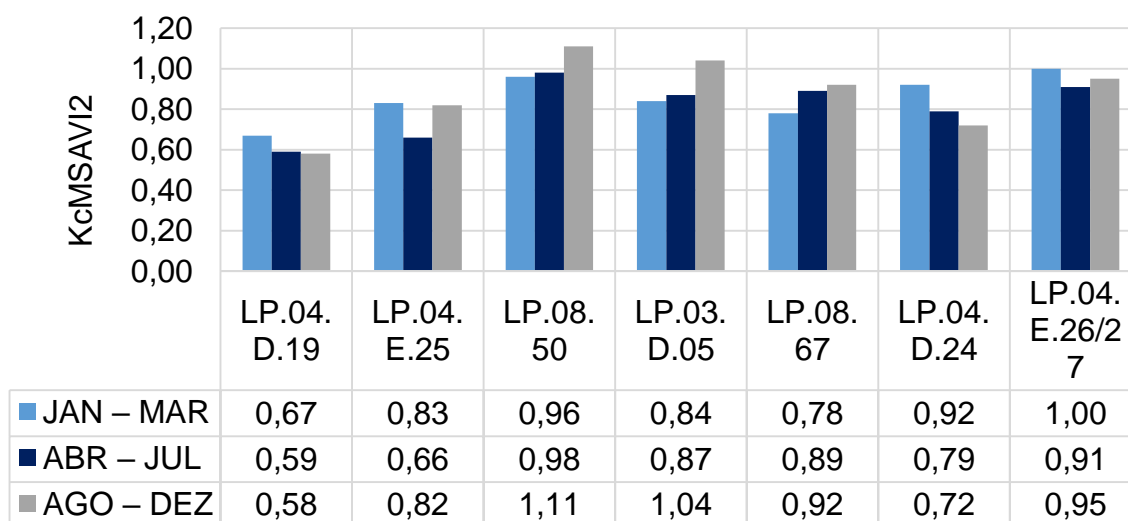


Figura 18 - Valores médios de $K_{C_{MSAVI2}}$ calculados por sensoriamento remoto para 2015, referenciados a sete lotes do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí - DITALPI



Assim como o K_c , o $K_{C_{MSAVI2}}$ é um fator de ajuste para a ET_c , que indica a necessidade hídrica da cultura. É possível modelar este coeficiente, por SR, para todos os meses do ano, desde que se tenham imagens disponíveis. Além disso, o $K_{C_{MSAVI2}}$ tem maior robustez, uma vez que é possível espacializar este coeficiente na área de estudo e, além disso, permite-se estabelecer uma irrigação de precisão dentro área, aplicando-se lâminas ajustadas para cada lote.

Em 2014, os registros máximos, médios e mínimos para o $K_{C_{MSAVI2}}$ foram de 1,24; 0,86 e 0,57, respectivamente. Semelhantemente a 2014 ocorreu em 2015, tendo

1,11; 0,86 e 0,58 para $K_{C_{MSAVI2}}$ máximos, médios e mínimos. Então, é possível notar que dentro do DITALPI há uma diferenciação entre os coeficientes de culturas ajustados ($K_{C_{MSAVI2}}$), o que sugere a importância de se delinear planos de irrigação diferentemente para cada lote do distrito. Farg et al. (2012) estimaram o K_c e ET_c da cultura do trigo usando os mesmos conceitos de sensoriamento remoto e verificaram alta correlação entre os valores ajustados por SR e os sugeridos pela FAO.

Para as condições edafoclimáticas de Fortaleza – CE, Calgaro e Braga (2012) descreveram o K_c da acerola variando de 0,70 a 1,45 e média de 0,98. Conceição (2005) descreveu que essa diferença apresentada nos registros de K_c deu-se por vários fatores.

Então, para que a ET_c seja utilizada em grandes plantios irrigados é preciso que a estimativa do K_c seja espacialmente distribuída, ou seja, produzida utilizando IV estimados por meio das reflectâncias, mensuradas nas bandas do vermelho e infravermelho, por meio do sensoriamento remoto.

Entretanto, a função do $K_{C_{MSAVI2}}$ para este trabalho foi de quantificar o K_c aplicado pelos produtores de acerola do DITALPI, por isso, notou-se que os produtores de acerola estão utilizando valores de K_c inferiores aos que foram definidos por Calgaro e Braga (2012).

4.6 Balanço Hídrico da Cultura

A fim de se determinar a variação do teor de água no solo e a quantidade de água armazenada por ele, realizou-se o Balanço Hídrico da Cultura (BHC) utilizando o CROPWAT

Foram confeccionados 28 BHC que são exibidos nas Figuras de 19 a 25. Nessas figuras estão representadas a *Depletion* (Variação do teor de água em mm) indicado na legenda em vermelho; a RAM (Água facilmente disponível) em marrom; a TAM (Umidade total disponível) em verde e a CC (Capacidade de campo) no eixo das abcissas em azul.

O BHC foi realizado nas condições normais de manejo para os anos de 2014 (Figuras A) e 2015 (Figuras B), utilizando a lâmina real aplicada em cada lote e o $K_{C_{MSAVI2}}$ que foi anteriormente ajustado para cada fase da cultura, também específico de cada lote. Além disso, realizou-se simulações adotando-se como critério a não ocorrência de restrições hídricas nos lotes, ou seja, assim que o teor de água no solo

atingisse a fração da RAM seria aplicado uma lâmina até que o teor de água atingisse a CC, para 2014 (Figuras C) e 2015 (Figuras D).

Foi possível caracterizar dois períodos de variação do teor de água nos gráficos A de todas as figuras. O primeiro período é verificado até os 160 DAP (Dias Após Plantio), quando constatou-se que a *Depletion* permaneceu entre a CC e RAM.

As condições normais de manejo foram programadas para aplicação das lâminas de irrigação em dias que não houvesse a ocorrência de precipitações pluviais. Entretanto, verificou-se nestes períodos que há picos acima da CC, que sugeriram que as lâminas de irrigação e/ou precipitações pluviais foram aplicadas em intervalos muito próximos e em momentos que o solo encontrava-se próximo a CC. O segundo período ocorreu após os 160 DAP, onde o teor de água no solo diminuiu e a linha de *Depletion* ficou registrada abaixo da RAM. Esta época ocorreu em meados de junho e foi caracterizada por ausência de precipitações e altas demandas evapotranspirométricas. Sendo assim, as lâminas de irrigação aplicadas pelos produtores após 160 DAP foram insuficientes para que o teor de umidade do solo retornasse a CC.

O comportamento da variação do teor de água apresentado em 2014 (Figuras A), ocorreu, semelhantemente, em 2015 e está exibido nos gráficos de todas as Figuras B. É possível notar dois períodos onde houve maior teor de água no solo, aos 140 DAP e menor teor após 140 DAP. Além disso, as precipitações pluviais ocorridas em 2015 registraram 692,7 mm, 29% menor que o registrado no ano de 2014, com 978,9 mm.

As simulações sob irrigação plena são exibidas pelos gráficos C e D, representando os anos de 2014 e 2015, respectivamente. Nota-se que estas condições ótimas de aplicação da água permitiram a variação do teor de água apenas entre a RAM e CC, utilizando exclusivamente a água prontamente disponível no solo. Isso indicou que houve um melhor aproveitamento das lâminas de irrigação aplicadas, bem como das precipitações pluviais ocorridas. Texeira e Azevedo (1995) constataram que a planta de acerola é bastante resistente à seca, suportando períodos com acentuadas deficiências hídricas, desde que fossem atendidas as exigências térmicas da planta. Porém, uma maior disponibilidade hídrica proporciona uma maior produção de ácido ascórbico pela planta, que é o foco dos produtores de acerola orgânica do DITALPI. O teor de vitamina C, peso e tamanho dos frutos, teor de sólidos solúveis e pH do suco, sofrem influência de fatores como precipitações

pluviais, temperatura, altitude, adubação, irrigação e a ocorrência de pragas e doenças (NOGUEIRA et al., 2002).

Dessa maneira, tanto as irrigações com déficits como a irrigações em excesso são desfavoráveis, reduzindo a produtividade da aceroleira. Por isso torna-se fundamental aplicar uma lâmina ótima, o que depende basicamente do monitoramento do balanço hídrico da cultura.

Figura 19 – Armazenamento de água no solo, em mm, do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, correspondendo ao Lote LP.04.D.19 nas condições reais de irrigação, para os anos de 2014 (A) e 2015 (B) e simulações sob irrigação plena para 2014 (C) e 2015 (D)

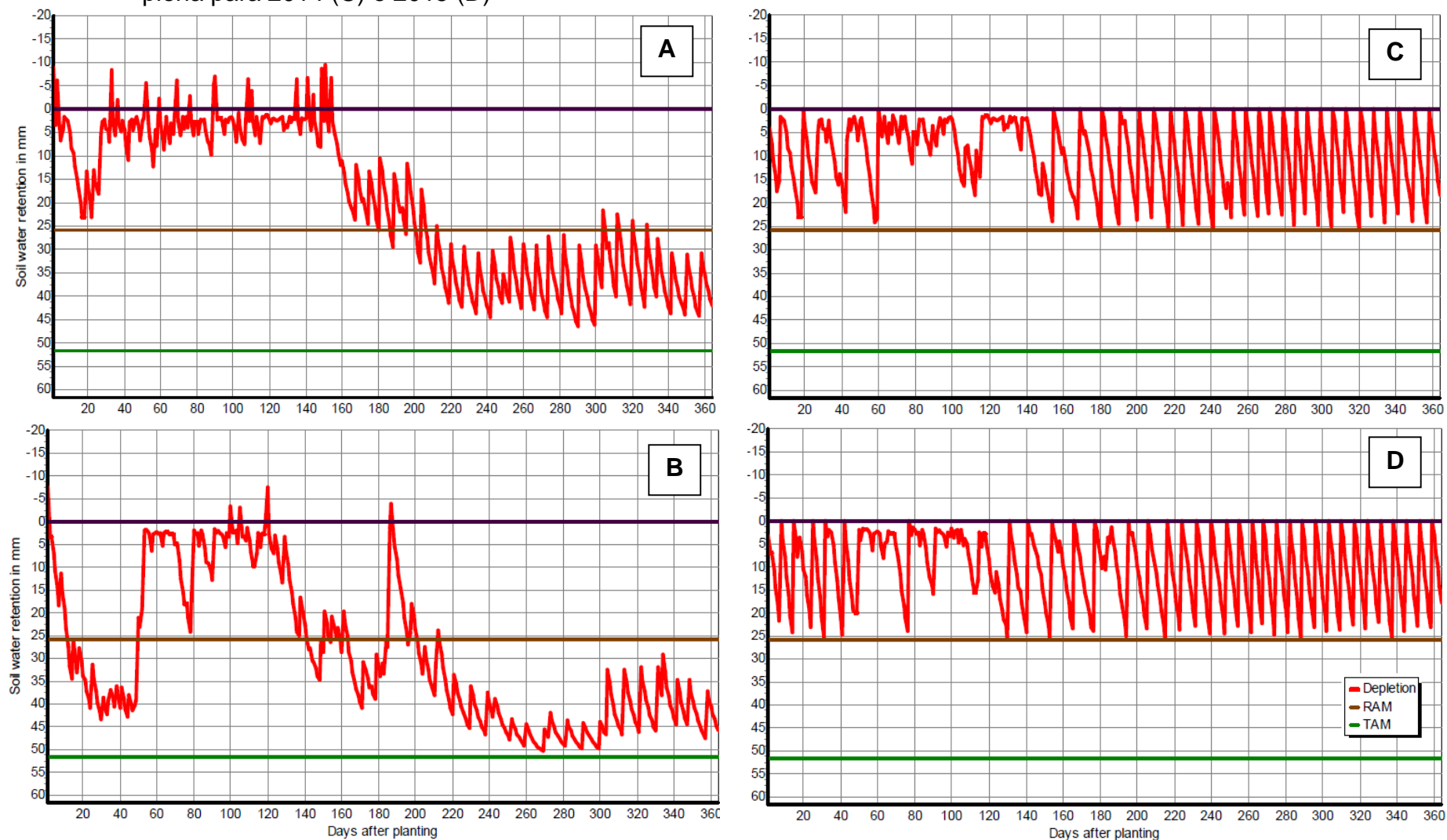


Figura 20 - Armazenamento de água no solo, em mm, do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, correspondendo ao Lote LP.04.E.25 nas condições reais de irrigação, para os anos de 2014 (A) e 2015 (B) e simulações sob irrigação plena para 2014 (C) e 2015 (D)

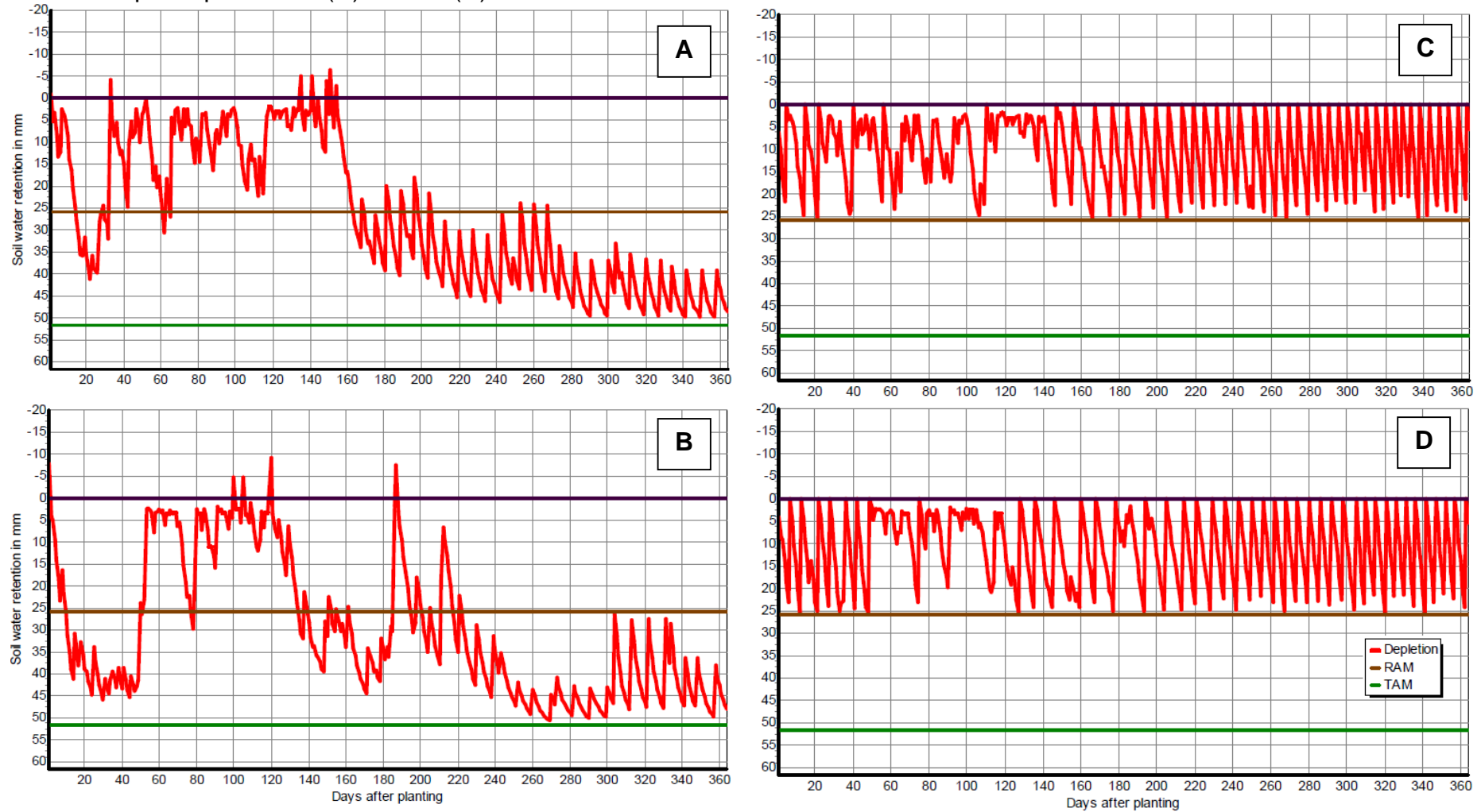


Figura 21 - Armazenamento de água no solo, em mm, do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, correspondendo ao Lote LP.08.50 nas condições reais de irrigação, para os anos de 2014 (A) e 2015 (B) e simulações sob irrigação plena para 2014 (C) e 2015 (D)

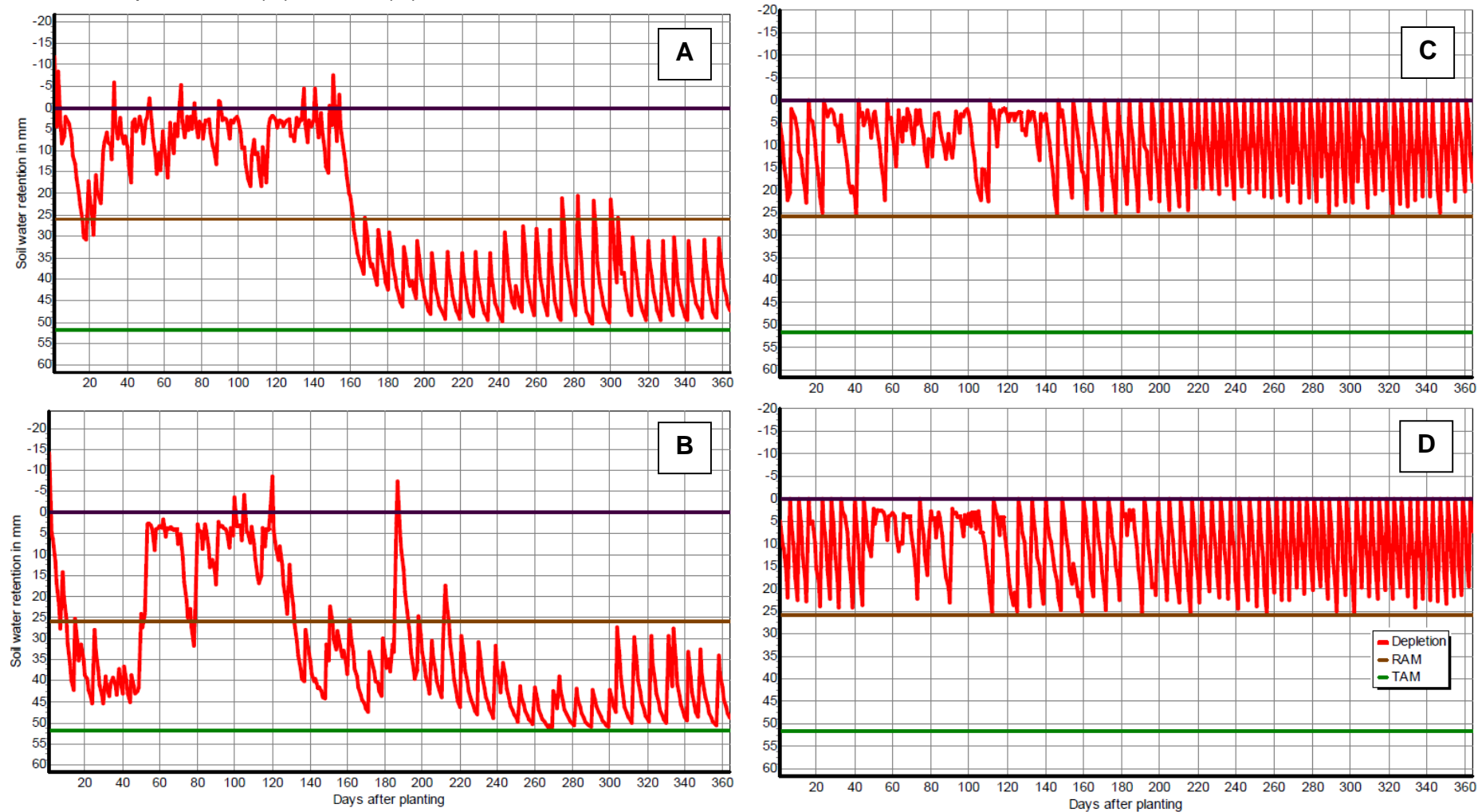


Figura 22 - Armazenamento de água no solo, em mm, do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, correspondendo ao Lote LP.03.D.05 nas condições reais de irrigação, para os anos de 2014 (A) e 2015 (B) e simulações sob irrigação plena para 2014 (C) e 2015 (D)

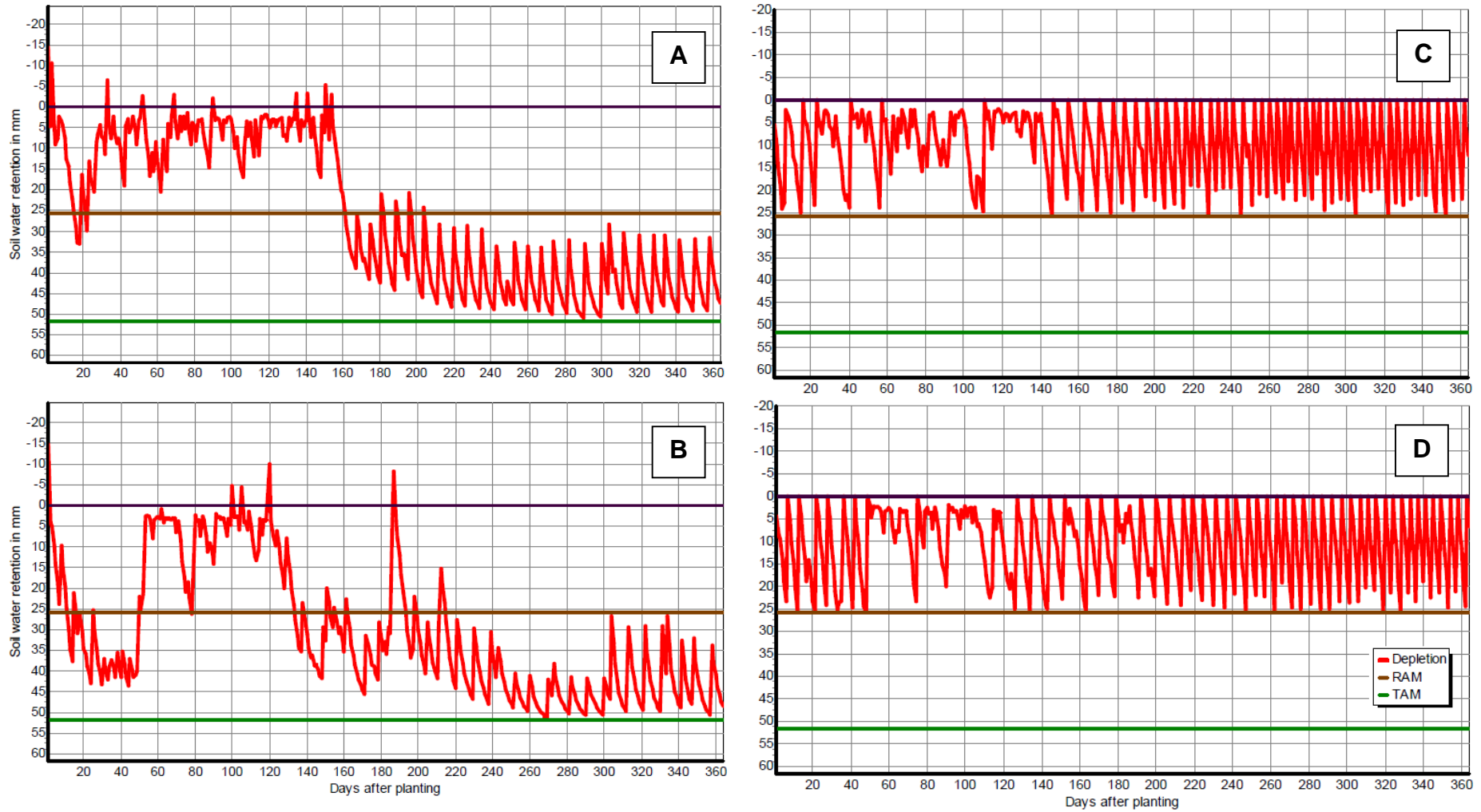


Figura 23 - Armazenamento de água no solo, em mm, do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, correspondendo ao Lote LP.08.67 nas condições reais de irrigação, para os anos de 2014 (A) e 2015 (B) e simulações sob irrigação plena para 2014 (C) e 2015 (D)

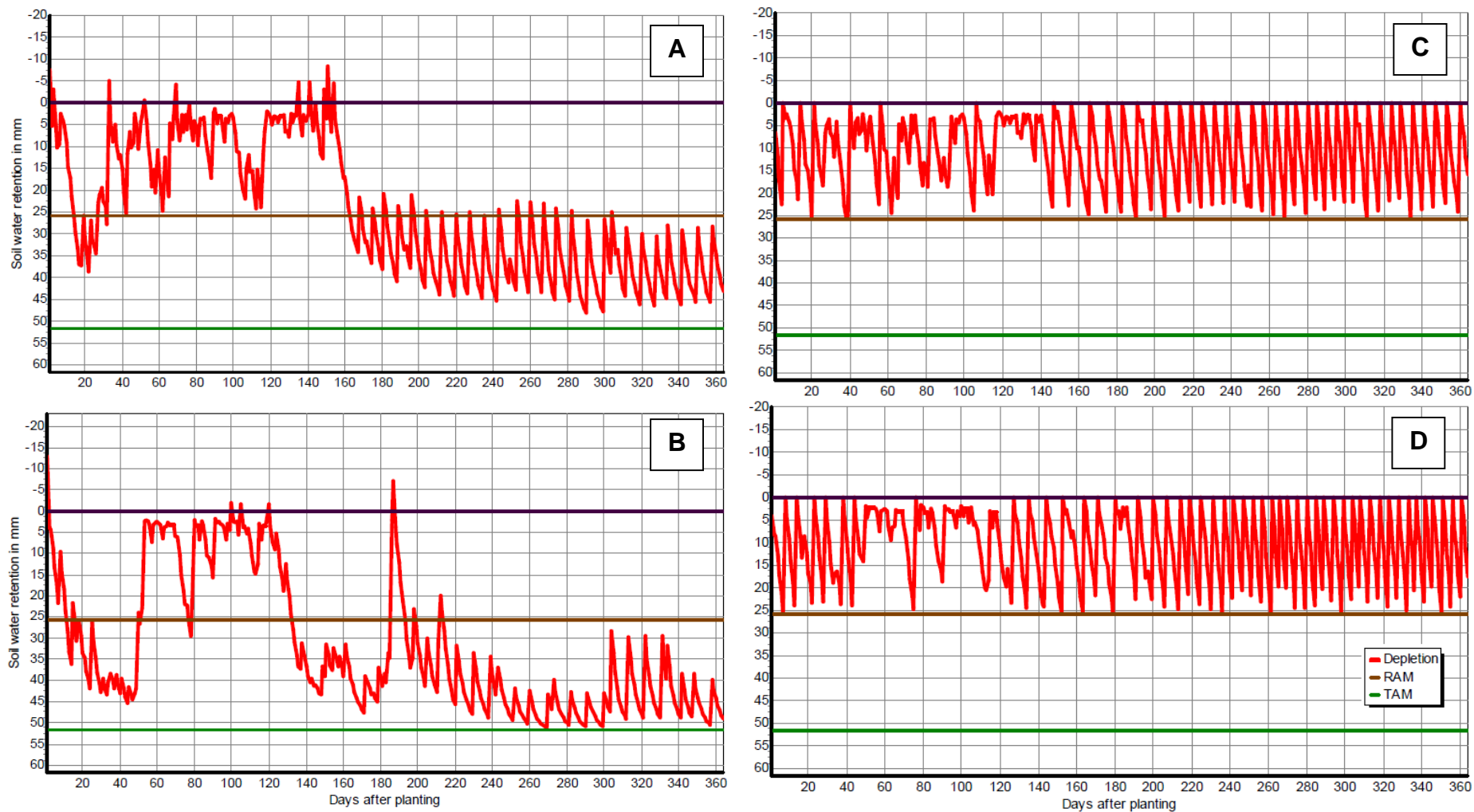


Figura 24 - Armazenamento de água no solo, em mm, do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, correspondendo ao Lote LP.04.D.24 nas condições reais de irrigação, para os anos de 2014 (A) e 2015 (B) e simulações sob irrigação plena para 2014 (C) e 2015 (D)

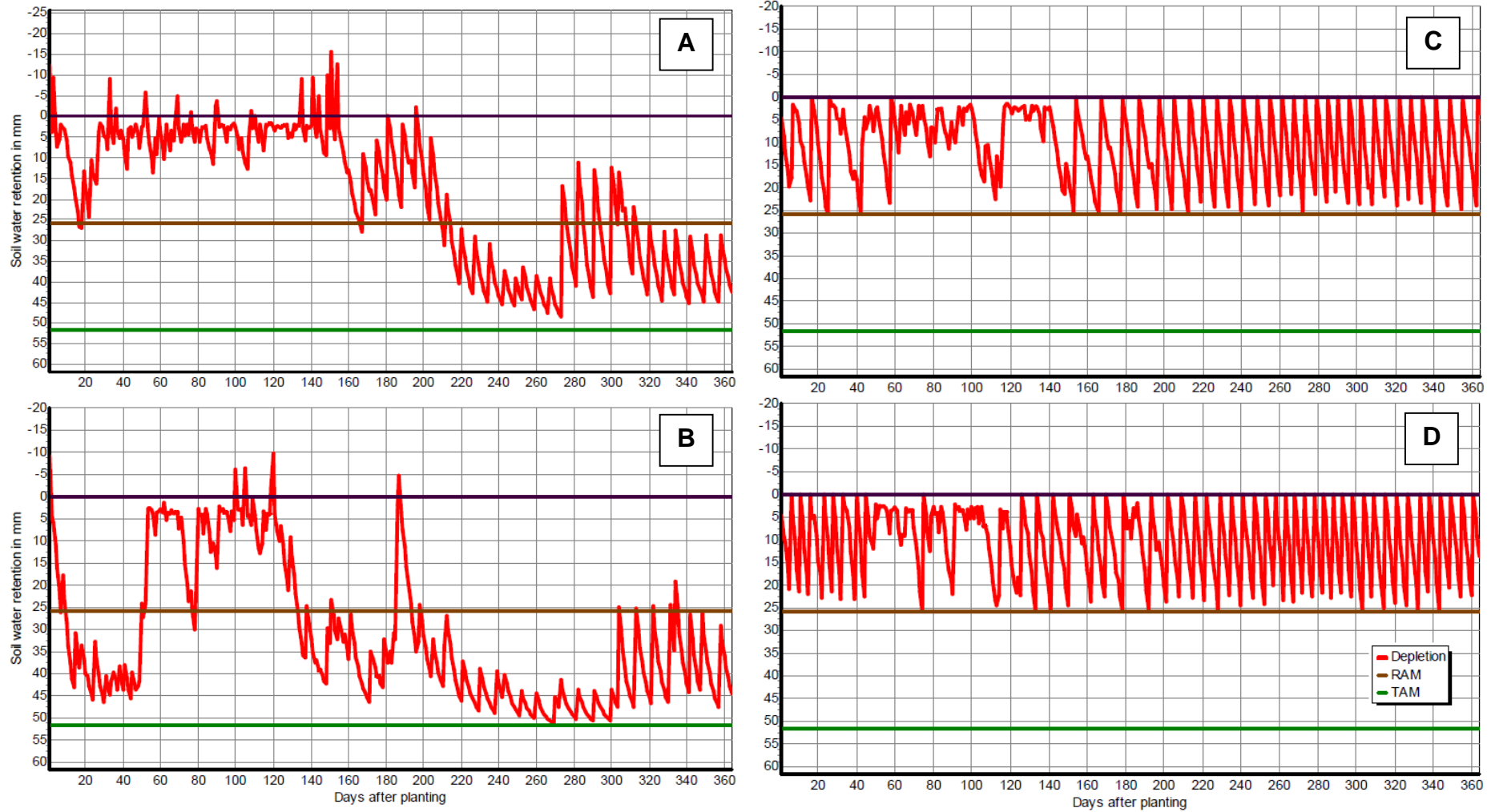
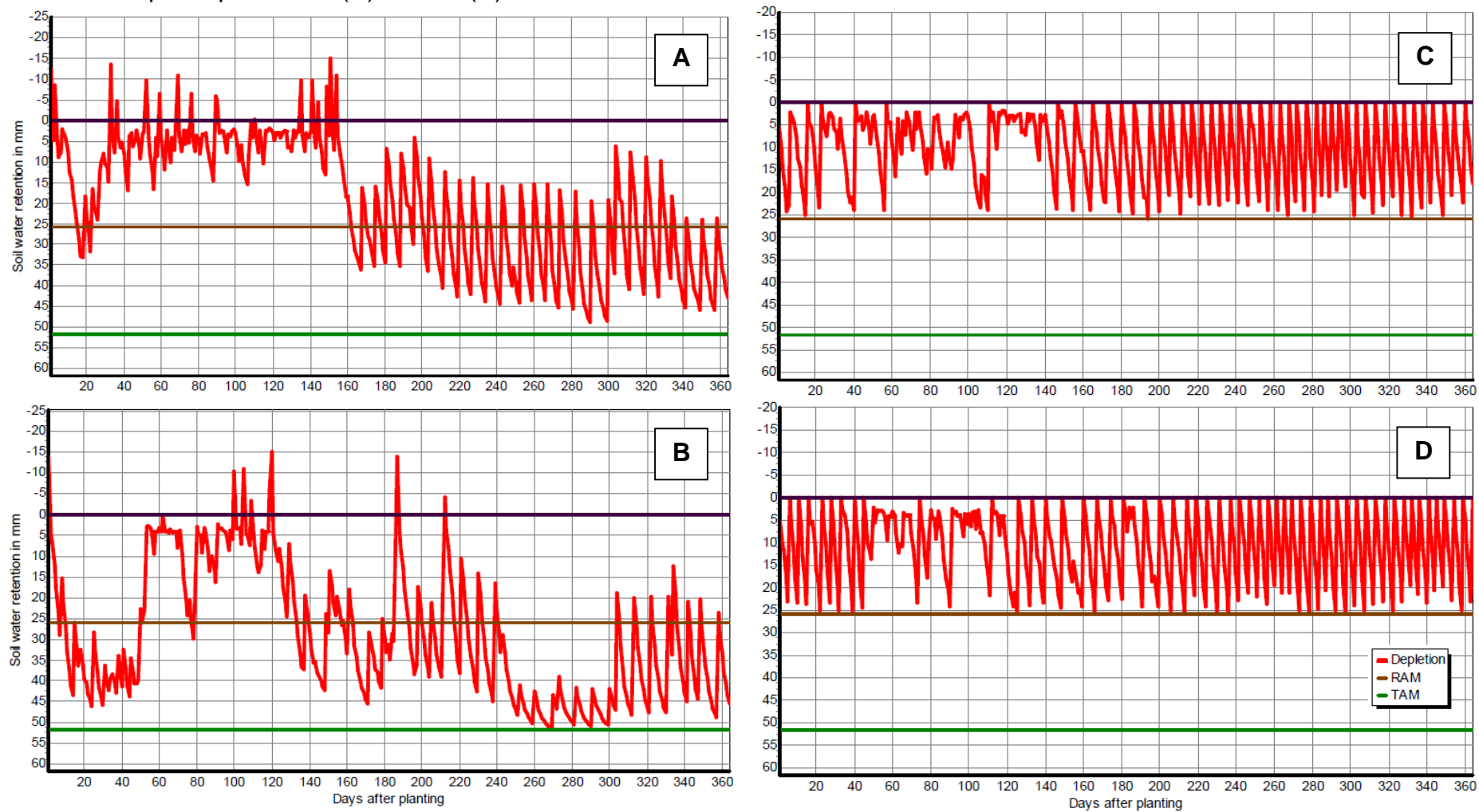


Figura 25 – Armazenamento de água no solo, em mm, do Distrito de Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí, correspondendo ao Lote LP.04.E.26/27 nas condições reais de irrigação, para os anos de 2014 (A) e 2015 (B) e simulações sob irrigação plena para 2014 (C) e 2015 (D)



4.7 Índices de Eficiência e Produtividade de Água

Os índices de eficiência e produtividade de água permitiram avaliar o desempenho de propriedades do DITALPI, onde verificou-se o nível de serviço ou operação entre as propriedades de irrigação e analisou-se a eficiência com a qual os recursos hídricos foram empregados.

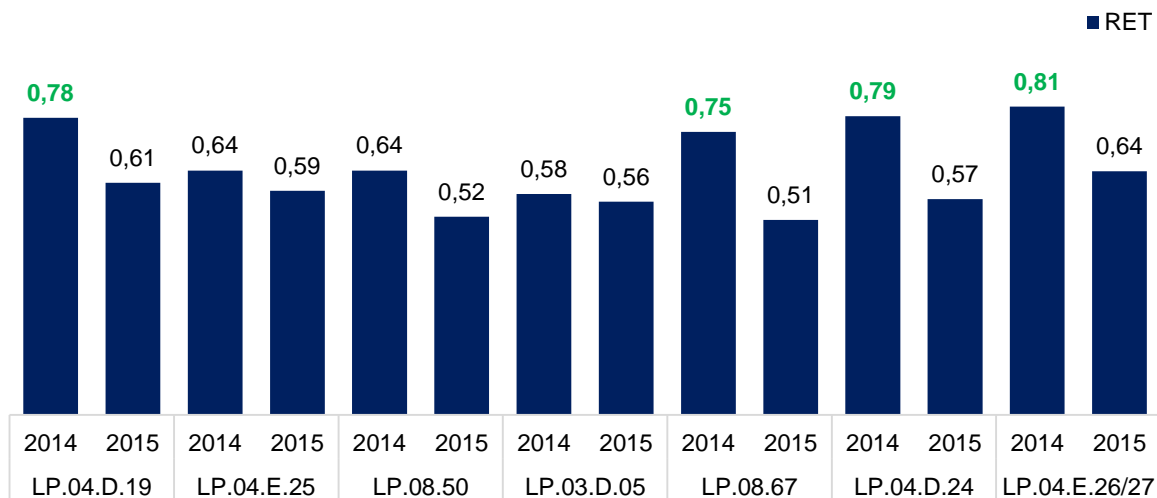
4.7.1 Evapotranspiração Relativa (RET)

O Índice de Evapotranspiração Relativa (RET) é adimensional e corresponde a razão entre a ET_c e ET_p . Ressalta-se que valores de RET mais próximos de 1 indicam que a ET_c da cultura foi próxima a ET_p , o que sugere que os irrigantes utilizaram mais eficazmente o recurso hídrico.

Na Figura 26 estão expostos os registros dos dois anos avaliados, bem como suas respectivas propriedades. Então, em 2014, os irrigantes que se destacaram foram dos lotes LP.04.D19, LP.08.67, LP.04.D.24 e LP.04.E.26/27 com RET 0,78; 0,75; 0,79 e 0,81, respectivamente. No ano de 2015, os índices não foram satisfatórios como em 2014, sendo RET 0,64 o maior valor encontrado. Em trabalho realizado por Bastiaanssen et al. (2001) com SR, o valor médio de RET no sistema de irrigação em Nilo Coelho – PE foi de 0,77. Em outro estudo realizado por Karataş et al. (2007) usando SR em três áreas de uma mesma bacia hidrográfica, obtiveram valores de RET em 0,64; 0,67 e 0,64. As médias de RET para este estudo em 2015 foram menores e, portanto, pode-se dizer que houve elevada demanda evapotranspirométrica neste ano e escassa precipitação pluvial, por conseguinte, as águas armazenadas a maiores profundidades foram usadas com maior frequência. Esta variação hídrica pode ser observada nas figuras de BHC e configuração climática mencionada anteriormente.

De acordo com Roerink et al. (1997), propriedades que desempenham um valor de $RET \geq 0,75$ é bastante aceitável para a agricultura irrigada. Os resultados obtidos pelos IV influenciaram diretamente na RET, pois a ET_c foi calculada com base no $K_{C_{MSAVI2}}$ e F_c , obtidos por sensoriamento remoto.

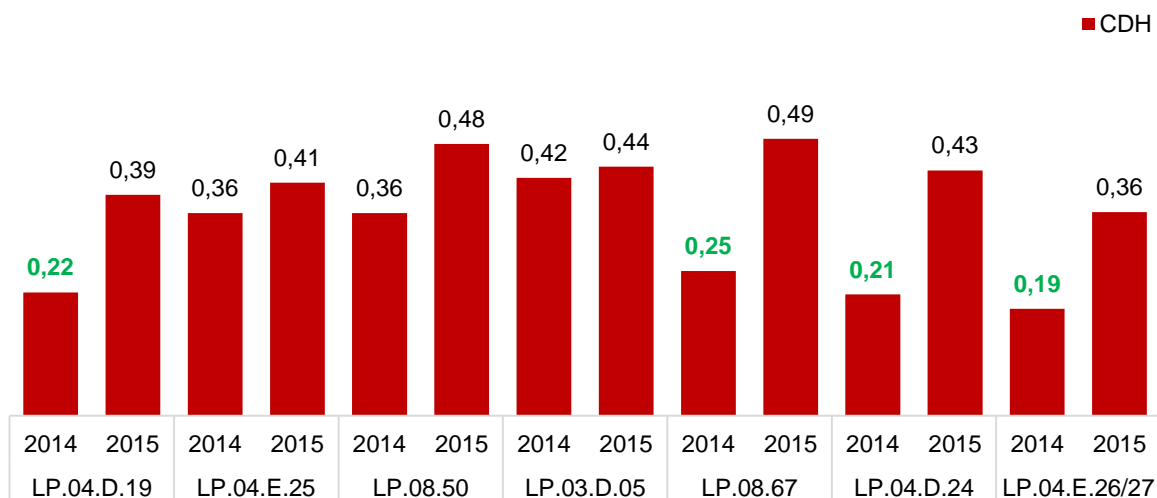
Figura 26 - Índice de Evapotranspiração Relativa (RET) do DITALPI, nas condições reais de irrigação, para 2014 e 2015



4.7.2 Coeficiente de Deficiência Hídrica (CDW)

Os Coeficientes de Deficiência Hídrica (CDW) da cultura estão exibidos na Figura 27 ao longo do período avaliado. Este índice é definido como a diferença entre a evapotranspiração potencial (ETp) e real do cultivo (ETc) dentro de uma área conforme definido pelo produtor. Destaca-se que o CDW relaciona-se inversamente ao RET, uma vez que informa a demanda a ser atendida para que a cultura permanecesse em ótimas condições hídricas.

Figura 27 - Coeficiente de Deficiência Hídrica (CDW) do DITALPI, nas condições normais de manejo, para 2014 e 2015



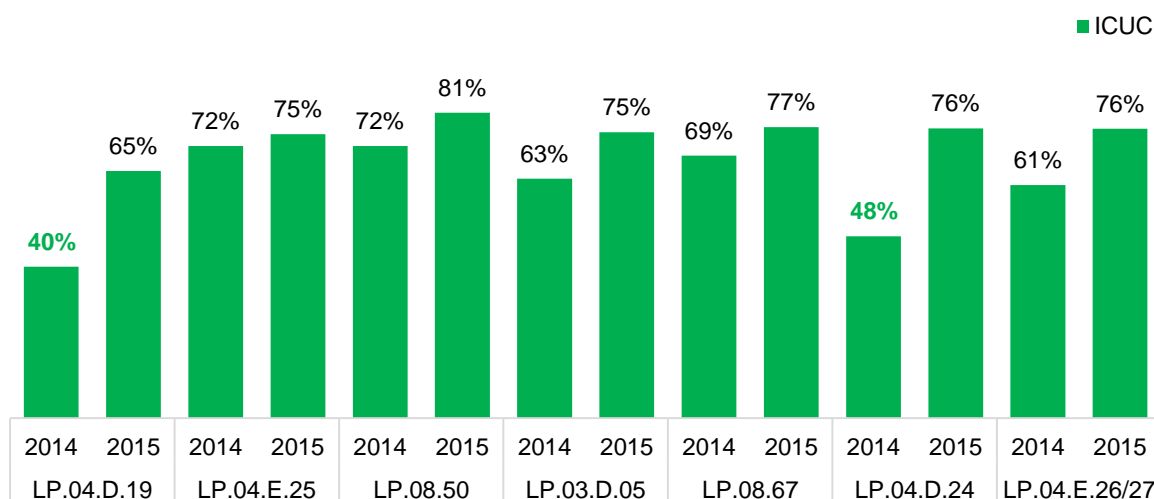
Desta maneira, o ano de 2014 apontou as menores deficiências, destacando-se os lotes LP.04.D19, LP.08.67, LP.04.D.24 e LP.04.E.26/27 com CDW 0,22; 0,25; 0,21; e 0,19;

0,21 e 0,19, respectivamente. Em trabalho realizado por Bastiaanssen et al. (2001) com SR, foi definido $CDW \leq 0,3$ como o nível permitido de deficiência. Em 2015, as demandas de água não foram atendidas com maior eficiência ao longo do ciclo da aceroleira. Algumas propriedades como LP.04.D19 e LP.04.E.26/27 apresentaram valores que se encontraram próximos do nível de deficiência sugerido.

4.7.3 Uso Consuntivo da Água de Irrigação (ICUC)

Seguindo a tendência do CDW, o Índice de Uso Consuntivo da Água de Irrigação (ICUC) representou a água que foi utilizada e não se encontra mais no local, ou seja, essa água foi consumida por processos evaporativos e transpirométricos. Sendo assim, na Figura 28, estão expostos os teores de água que não se encontram mais nas propriedades em seus respectivos anos. Apontou apenas os lotes LP.04.D19 e LP.04.D.24 como as propriedades com os menores ICUC computados em 2014, que registraram 40% e 48%, respectivamente. Em 2015 as porcentagens de uso consuntivo de água elevaram-se consideravelmente e as propriedades registraram ICUC entre 65% e 76%.

Figura 28 - Índice de Uso Consuntivo da Água de Irrigação (ICUC) do DITALPI, nas condições normais de manejo, para 2014 e 2015



Mesmo entendendo que a água é um insumo importantíssimo para irrigação, tendo seu uso na regulação da temperatura das plantas e produção, tornam-se necessários estudos que definam classificações informando médias críticas e ótimas de ICUC para auxiliar o gestor na tomada de decisão. O ICUC leva em consideração a Lâmina Bruta em seu algoritmo, então grande parte da água “perdida” ou não

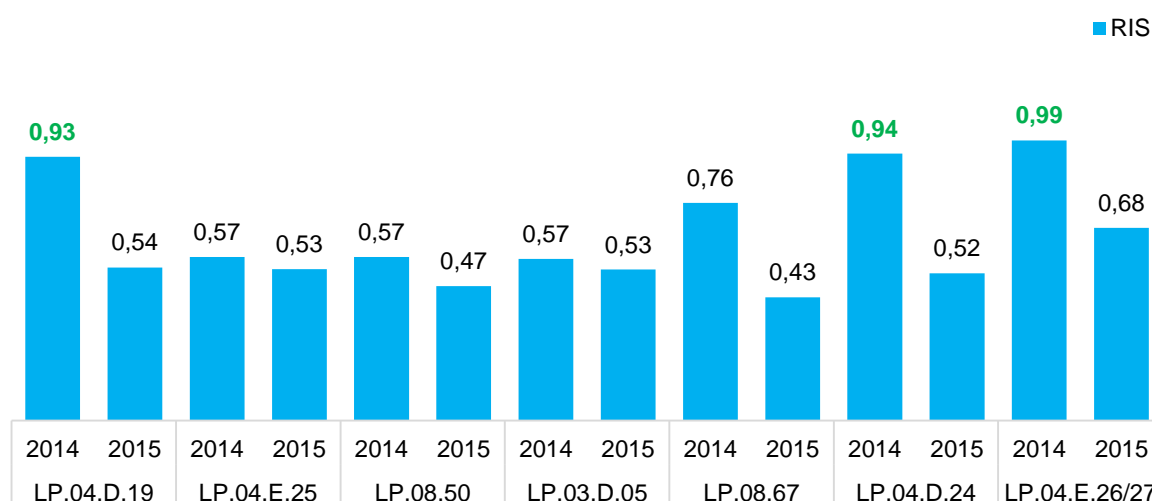
aproveitada eficazmente foi por conta dos sistemas de irrigação mal dimensionados e/ou mal manejados. Outro fator que afetou indiretamente e contribuiu no incremento do ICUC foi a estiagem prolongada, pois requer maior lâmina aplicada para suprir a demanda da cultura utilizando sistemas de irrigação com problemas de distribuição.

Como já mencionado anteriormente no item de configuração climática, as precipitações pluviais ocorridas foram insuficientes nos segundos semestres dos anos e isso proporcionou, indiretamente, o incremento no ICUC.

4.7.4 Suprimento Relativo de Irrigação (RIS)

O Suprimento Relativo de Irrigação (RIS) informou a condição dos plantios por meio da relação entre a água fornecida pela irrigação e o volume de água de irrigação requerida para máxima produção. Na Figura 29 está designado o cenário das propriedades que melhor tiveram suas demandas hídricas atendidas pelos irrigantes, sendo os lotes LP.04.D.19, LP.04.D.24 e LP.04.E.26/27 os que apresentaram valores mais elevados em 2014. Em termos de porcentagem, estas propriedades que foram elencadas, aplicaram respectivamente 93%, 94% e 99% de suas lâminas requeridas. Em decorrência disso, foram as propriedades que registraram maiores produções do DITALPI.

Figura 29 - Índice de Suprimento Relativo de Irrigação (RIS) do DITALPI, nas condições normais de manejo, para 2014 e 2015



Percebe-se na Figura 29, que os demais produtores não dedicaram atenção para este fator que é primordial para o sucesso na produção, pois visível o baixo suprimento de água aplicado aos outros lotes do DITALPI.

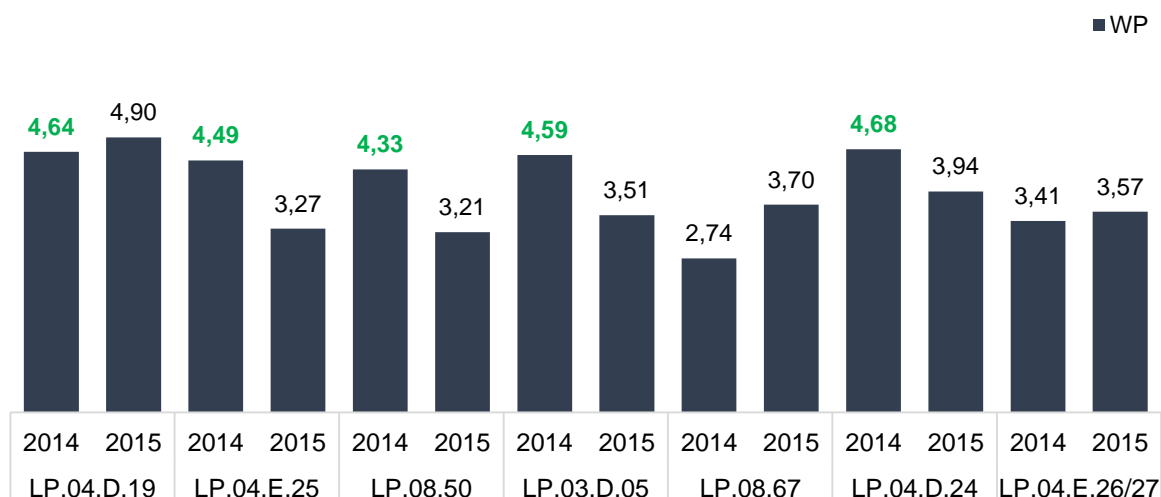
Assim como nos outros índices já mencionados, o ano de 2015 mostrou-se como o pior cenário, até mesmo para as propriedades mais produtoras em 2014, que tiveram seus índices rebaixados no ano seguinte. Isto sugere que o DITALPI precisa focar empenhos para mitigar a ação que os efeitos climáticos promovem no distrito.

4.7.5 Produtividade de água (WP)

A Produtividade de Água (WP) da cultura calculada indicou as propriedades que tiveram os melhores desempenhos produtivos. Este índice é dependente da relação entre a produção total obtida e o do volume de água evapotranspirada pela aceroleira.

Segundo a Figura 30, os resultados de WP foram bastante diversificados, tendo em vista que os lotes avaliados são geridos por irrigantes diferentes, o que ocasiona, por conseguinte, manejos distintos. As ETc da aceroleira, que serviu de base para o cálculo do WP, foram distintas para cada lote, pois estas correlacionavam-se com os coeficientes de cultura ajustados por sensoriamento remoto ($K_{CMSAVI2}$). Além disso a produção também está atrelada as precipitações ocorridas e, este índice não contempla essa informação em seu algoritmo.

Figura 30 - Índice de Produtividade da Água (WP) do DITALPI, nas condições normais de manejo, para 2014 e 2015.



O WP variou de 2,74 a 4,90 kg m^{-3} . Em 2014, cinco lotes produziram acima de 4 kg m^{-3} , sendo LP.04D.19, LP.04E.25, LP.08.50, LP.03.D.05 e LP.04.D.24. Em 2015 apenas o lote LP.04D.19 permaneceu nesse patamar de produção.

Não há estudos verificando a produtividade de água na cultura da aceroleira utilizando SR. Entretanto, utilizando os conceitos de SR, Teixeira et al. (2017) encontraram WP variando de 1,2 a 3,6 kg m⁻³ para o limoeiro nas condições climáticas de Minas Gerais, Brasil.

O índice RIS informou propriedades que receberam quase totalmente a demanda de água requerida, entretanto, percebe-se por meio do WP que as produtividades destes não mantiveram-se diferentes dos outros lotes, que receberam menos água de irrigação. Alguns fatores podem ter acontecido como, a perda de água entre a captação e o aspersor e perdas de frutos entre a colheita e pesagem.

Sabe-se que quando se trata de produtividade de água ou eficiência do uso da água, busca-se produzir mais gastando menos, entretanto é necessário ter em mente que essa economia hídrica não deve intervir na demanda transpirométrica da planta. Há diversas medidas que podem ser tomadas para usar a água racionalmente, como: a utilização de sistemas de irrigação projetados para cada lote; manejo de irrigação correto; utilização de coberturas de solo para que não haja perdas por evaporação ou degradação do solo por escoamento superficial.

5 CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos pôde-se concluir que:

- a) As técnicas de Sensoriamento Remoto, especificamente o índice de vegetação MSAVI₂, forneceram subsídios para a avaliação do uso da água do Distrito Irrigação dos Tabuleiros Litorâneos do Piauí;
- b) A Fração de Cobertura (Fc) para a cultura da aceroleira foi registrada com valor médio de 0,58;
- c) Os produtores do DITALPI estão utilizando o K_{CMSAVI2} médio de 0,80 (Jan a Mar) e de 0,87 (Abril a Dez), que está abaixo dos valores recomendados;
- d) Os índices de eficiência e produtividade de água de irrigação poderão ser utilizados informando, ao gestor da propriedade ou do distrito de irrigação, qual é o desempenho dos sistemas para a utilização da água e, em conjunto com outros indicadores, poderá ajudar a identificar o uso correto para melhorar o desempenho de irrigação dentro do distrito. Assim, o uso destes indicadores ao longo do tempo possibilitará a identificação das causas e soluções antes que as medidas corretivas tornem-se mais caras;
- e) A produtividade média dos produtores avaliados foi de 25 t ha⁻¹ ano⁻¹ e a produtividade de água de irrigação foi em média 4 kg m⁻³;

Para estudos futuros de avaliação da produtividade de água do DITALPI, recomenda-se utilizar imagens com maior resolução temporal e espacial para tomada de decisão no manejo da irrigação.

6 REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 300p. 1998. (**FAO Irrigation and Drainage Paper, 56**).
- ALVES, R. E. Cultura da acerola. In: DONADIO, L. C.; MARTINS, A. B. G.; VALENTE, J. P. (Eds.) **Fruticultura tropical**. Jaboticabal: FUNEP; UNESP, Faculdade de Ciências Agrônômicas e Veterinárias, 1992. p. 15-37.
- ALVES, R. E.; MENEZES, J. B. Botânica da aceroleira. In: SÃO JOSÉ, A. R.; ALVES, A. E. (Eds.) **Cultura da acerola no Brasil: produção e mercado**. Vitória da Conquista: UESB, 1995. p. 7-14.
- ALVES, R.E. Características das frutas para exportação. In: GORGATTI NETTO, A.; ARDITO, E.F.G.; GARCIA, E.E. (Eds.) **Acerola para exportação: procedimentos de colheita e pós-colheita**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1996. p.9-12. (Série Publicações técnicas FRUPEX, 21).
- BARBOSA, K. M. do N. **Monitoramento espacial de biomassa e carbono orgânico da vegetação herbácea de várzea na Amazônia Central**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Tese de Doutorado, 131 p., 2006.
- BASTIAANSSEN, W.G.M.; BRITO, R.A.L.; BOS, M.G.; SOUZA, R.A.; E.B. CAVALCANTI, M.M. Bakker Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: benchmarks from Nilo Coelho, Brazil Irrigation and Drainage Systems, 15 (2001), pp. 53-79
- BASTOS, E. A.; NUNES, B. H.; ANDRADE JUNIOR, A. S. Dados agrometeorológicos para o município de Parnaíba, PI. Teresina: EMBRAPA, 2000. 27p. (**Documentos, 46**).
- BERNARDO, S; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. Ed. Atual. e Ampl. Viçosa: UFV, 2006. 625p.
- BOS, M.G, BURTON, M.A., MOLDEN, D.J. **Irrigation and drainage performance assessment – practical guidelines**. CABI Publishing, Wallingford, UK, 2005.
- BRASIL, Agência Nacional de Águas. **Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil - 2014: relatório síntese / Agência Nacional de Águas**. -- Brasília: ANA, 2016. 33 p.: il.
- BRASIL, EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.
- BRASIL. Plano Nacional de Recursos Hídricos. **Panorama e estados dos recursos hídricos do Brasil**. v.1. MMA. Brasília, 2006.

BRITO, R.R. **Crerios de manejo na irrigaçaõ do feijoeiro em trs texturas de solo**. 2014. 53 f. Dissertaçaõ (Mestrado) - Curso de Agronomia (Irigaçaõ e Drenagem), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2014. Disponível em: <<http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq1087.pdf>>. Acesso em: 30 jul. 2014.

CALGARO, M.; BRAGA, M. B. A cultura da acerola. **Área de Informaçã da Sede-Colec Criar, Plantar, ABC, 500P/500R (INFOTECA-E)**.3d. Brasília-DF: Embrapa, 2012

CARVALHO, R. A. **Análise econômica da produçã de acerola no município de Tomé- Açú**, Pará. Belém: EMBRAPA Amazônia Oriental, 2000. 21 p. (Documento, 49)

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v 113, n. 5, p. 893–903, 2009.

CONCEIÇÃO, M. A. F. **Sistema de Produçã de Uva de Mesa do Norte de Minas Gerais**. Embrapa Uva e Vinho 2005. Versã Eletrônica Disponível em: <<https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Uva/MesaNorteMinas/irrigacao.htm>>. Acesso em: 11 out. 2007.

COUTO, L.; SANS, L. M.A. **Requerimentos das águas das culturas**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Circular Técnica n.20, Sete Lagoas, 2002.

DAINESE, R. C. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicado ao estudo temporal do uso da terra e na comparaçã entre classificaçã não-supervisionada e análise visual**. 2001. 185 f. Dissertaçaõ (Mestrado) - Curso de Energia na Agricultura, Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2001. Disponível em: <http://base.repositorio.unesp.br/bitstream/handle/unesp/90651/dainese_rc_me_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01 set. 2014.

DNOCS, Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. **Distrito de Irrigaçã Tabuleiros Litorâneos do Piauí**. Disponível em: <http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/pi/tabul_litoraneos.htm>. Acesso em: 01 set. 2014.

DONATO, S. L. R.; COELHO, E. F.; MARQUES, P. R. R.; ARANTES, A. de M.; SANTOS, M. R. dos; OLIVEIRA, P. M. de. Ecofisiologia e eficiência de uso da água em bananeira. In: **REUNIÃO INTERNACIONAL ACORBAT**, 20, 2013, Fortaleza. Acorbat: 40 anos compartilhando ciência e tecnologia. Fortaleza: Instituto Frutal: Acorbat Internacional, 2013.

DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. 1977. Crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper** No. 24. Rome, FAO.

ESRI. **Arcgis Software**. <http://www.esri.com/software/arcgis/explorer/index.html>, 2015

ESQUERDO, J. C. D. M.; COUTINHO, A. C.; SANCHES, L. B.; RIBEIRO, B. M. de O.; ZAKHAROV, N. Z.; TERRA, T. N.; MANABE, V. D. **Dinâmica da agricultura anual na região do Matopiba**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. Anais... São José dos Campos: INPE, 2015.

EUA. Unites States Geological Survey -USGS. Landsat processing details. 2014. Disponível em: <http://landsat.usgs.gov/Landsat_Processing_Details.php>. Acesso em: 22 ago. 2016.

FAO. **Manual CROPWAT**. M. Smith, AGLW, Rome. 1989.

FARG, E. et al. Estimation of Evapotranspiration ET_c and Crop Coefficient K_c of Wheat, in south Nile Delta of Egypt Using integrated FAO-56 approach and remote sensing data. The **Egyptian Journal Of Remote Sensing And Space Science**, [s.l.], v. 15, n. 1, p.83-89, jun. 2012. Elsevier BV.

FIGUEIREDO, D. 2005. Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto. Disponível em:<http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2012.

FOLHES, M.T.; RENNÓ, C.D.; SOARES, J.V. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil, **Agricultural Water Management**, Volume 96, Issue 10, October 2009, Pages 1398-1408, ISSN 0378-3774, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.021>.

FORMAGGIO, A. R. Sensoriamento remoto: um olhar espacial sobre os canaviais. **Revista Visão Agrícola** [on-line]. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, n. 1, 2004. Semestral. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br/visaoagricola/edicoes/cana-de-acucar>>. Acesso em: 29 set 2016.

GLENN, E.P.; NEALE, C.M.U.; HUNSAKER, D.J.; NAGLER, P.L. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. *Hydrol. Process.* 2011, 25, 4050–4062.

GOOGLE, INC. **Google Maps**. Disponível em: <http://code.google.com/apis/maps/documentation/directions/> Acesso em: setembro de 2017

GONZALEZ-DUGO, M. P.; NEALE, C. M. U.; MATEOS, L.; KUSTAS, W. P.; PRUEGER, J.; ANDERSON, M. C.; LI, F. A comparison of operational remote-sensing-based models for estimating crop evapotranspiration, **Agricultural and Forest Meteorology**, 149, 1843–1853, 2009.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 53-70, 1988.

JAAFAR, H. H.; AHMAD, F. A. Crop yield prediction from remotely sensed vegetation indices and primary productivity in arid and semi-arid lands. **International Journal**

Of Remote Sensing, [s.l.], v. 36, n. 18, p.4570-4589, 11 set. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2015.1084434>.

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p. Tradução da segunda edição.

JUNQUEIRA, K. P.; PIO, R.; VALE, M. R. do; RAMOS, J. D. **Cultura da acerola**. Lavras, MG: UFLA, 2004. 27 p.

KARATAŞ, B.S.; AKKUZU, E.; AVCI, M. Determination of Irrigation performance of water user associations in the vicinity of Sarigöl and Alaşehir using remote sensing Turkish **Journal of Agriculture and Forestry**, 31 (2007), pp. 287-296

LEÃO, R. A. O., TEIXEIRA, A. S., ANDRADE, E. M., OLIVEIRA, F. Delimitação e caracterização automática de uma micro bacia hidrográfica da Fazenda Experimental Vale do Curu. Pentecoste-CE. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 35, n.1, p. 26-35, Jan.-Jun. 2004.

LEITE, B. S. **Caracterização do meio físico em bacias hidrográficas com suportes de sensoriamento remoto e geoprocessamento**. 2013. 46 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Estadual Paulista Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2013. Disponível em: http://base.repositorio.unesp.br/bitstream/handle/unesp/95722/leite_bs_me_rcla.pdf?sequence. Acesso em: 15 mar. 2014.

MANICA, I. ; ICUMA, I. M. ; FIORAVANÇO, J. C. ; PAIVA, J. R. de; PAIVA, M. C.; JUNQUEIRA, N. T. V. **Acerola: tecnologia de produção, pós-colheita, congelamento, exportação, mercados**. Porto Alegre: Cinco continentes, 2003. 397 p.

MARCUSSI, A. B.; BUENO, C. R. P.; MIQUELONI, D. P. ARRAES, C. L. UTILIZAÇÃO DE INDICES DE VEGETAÇÃO PARA OS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRAFICA. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 11, n. 35, p.41-53, set. 2010. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/16000/9020>>. Acesso em: 21 set. 2016.

MARKHAM, B. L; BARKER, J. L. (1987). Thematic Mapper band pass solar exoatmospherical irradiances. **International Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 3, pp. 517-523.

MASCHIO, R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S de; MOTA, P. R. D.; MELO, F. B.; MENDES, A. G. Propriedades físico-hídricas e índice de qualidade dos solos no distrito de irrigação tabuleiros litorâneos do Piauí. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 18., 2008, São Mateus. O equilíbrio do fluxo hídrico para um agriculturta irrigada sustentável. São Mateus: ABID, 6 p. 2008.

MATEOS, L. et al. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 125, p.81-91, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.005>.

MATEOS, L. et al. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 125, p.81-91, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012.11.005>.

MENESES, P. R. Definição de Sensoriamento Remoto. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T (Org.). **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPQ, UNB, 2012. Cap. 1, p. 11-33.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001. 250p.

MOREIRA, M.A.; ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T. Análise do comportamento espectral de café em imagens do TM e ETM+ do Landsat-5 e 7. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 189-196.

NOGUEIRA, R.J.M.C.; MORAES, J.A.P.V.; BURITY, H.A. Efeito do estágio de maturação dos frutos nas características físico-químicas de acerola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.4, p.463-470, 2002.

NONINO, C.A. Unesp de Jaboticabal faz melhoramento de acerolas. **Suplemento Agrícola do Estado de São Paulo**, abril de 1977.

PADILLA, F. L. M. et al. Integration of vegetation indices into a water balance model to estimate evapotranspiration of wheat and corn. **Hydrology And Earth System Sciences**, [s.l.], v. 15, n. 4, p.1213-1225, 12 abr. 2011. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-15-1213-2011>

PAIVA, J. R.; ALVES, R. E.; BARROS, L. M. Melhoramento genético da acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) na Embrapa Agroindústria Tropical. In: QUEIRÓZ, M. A. de; GOEDERT, C. O.; RAMOS, S. R. R. (Eds.). **Recursos genéticos e melhoramento de plantas para o Nordeste brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido; Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 1999a. Disponível em: <<http://www.cpatsa.embrapa.br>>. Acesso em: 14 set. 2016.

PAULA, V. H. N. et al. ANÁLISE DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO (ET) E DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO MELHORADO (EVI) PARA O MUNICÍPIO DE BOTUCATU-SP POR MEIO DE DADOS DO SENSOR MODIS. In: SINTAGRO – SIMPÓSIO NACIONAL DE TECNOLOGIA EM AGRONEGÓCIO, 9., 2017. **Anais...** . Botucatu: Sintagro, 2017. p. 1 - 12. Disponível em: <<http://www.sintagro.cps.sp.gov.br/art/artigoindex.php?id=23>>. Acesso em: 17 jul. 2017.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação**. São Paulo: Parêntese, 2007. 127p.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. v. 1, 176p.

QI, J.; CHEHBOUNI, A.; HUETE, A. R.; KERR, Y. H. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.48, p.119–126, 1994.

QUARTEZANI, W. Z. GEOESTATÍSTICA, SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA E **SENSORIAMENTO REMOTO NA ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DO CAFÉ CONILON**. 2012. 82 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

ROERINK, G.J.; BASTIAANSEN; W.G.M. J.; CHAMBOULEYRON, M. Menenti Relating crop water consumption to irrigation water supply by remote sensing. **Water Resources Management**, 11 (6) (1997), pp. 445-465

ROY, D. P. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v. 144, p. 154-172, 2014.

SHOBAIRI, S; LI, M. (2016) Dynamic Modelling of VFC from 2000 to 2010 Using NDVI and DMSP/OLS Time Series: A Study in Guangdong Province, China. **Journal of Geographic Information System**, 8, 205-223. doi: [10.4236/jgis.2016.82019](https://doi.org/10.4236/jgis.2016.82019).

SOUSA, V. F.; COELHO, E, F.; ANDRADE JUNIOR, A. S.; FOLEGATTI, M.V.; FRIZZONI, J. S. Eficiência do uso da água pelo meloeiro sob diferentes frequências de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, Pb, v. 4, n. 2, p.183-188, 2000. Disponível em: <<http://www.agriambi.com.br/revista/v4n2/183.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2014.

TEIXEIRA, A. H. de C.; AZEVEDO, P. V. de. Potencial agroclimático do estado de Pernambuco para o cultivo da acerola. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, p. 105-113, 1994.

TEXEIRA, A. H. C.; AZEVEDO, P. V. Índices-limite do clima para o cultivo da acerola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, n. 12, p.1403-1410, dez. 1995. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/91697>>. Acesso em: 20 out. 2017.

TEIXEIRA, Antônio Heriberto de Castro et al. Componentes da produtividade da água modelados por sensoriamento remoto em limoeiros irrigados de Minas Gerais. **Agrometeoros: Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 1, n. 25, p.237-247, ago. 2017. Disponível em: <<https://seer.sct.embrapa.br/index.php/agrometeoros/article/view/26284>>. Acesso em: 1 nov. 2017.

VALENTE, R. O. A. **Análise da estrutura da paisagem na Bacia do rio Corumbataí**, SP. 2001.162 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

ZHENGBIN, Z.; PING, X.; HONGBO, S.; MENGJUN, L.; ZHENYAN, F.; LIYE, C. Advances and prospects: Biotechnologically improving crop water use efficiency, **Critical Reviews in Biotechnology**, Londres, v.31, n.3, p.281-293, 2011.