

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

Diogo Silveira Kersten

**ESTIMATIVA DA DEMANDA HÍDRICA DA CULTURA DO MILHO IRRIGADO
NO SUL DO BRASIL UTILIZANDO IMAGENS ORBITAIS E K_c DUAL**

Santa Maria, RS
2018

Diogo Silveira Kersten

**ESTIMATIVA DA DEMANDA HÍDRICA DA CULTURA DO MILHO IRRIGADO
NO SUL DO BRASIL UTILIZANDO IMAGENS ORBITAIS E K_c DUAL**

Tese de doutorado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Dr. Reimar Carlesso

Santa Maria, RS
2018

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Silveira Kersten, Diogo
Estimativa da demanda hídrica da cultura do milho irrigado no Sul do Brasil utilizando imagens orbitais e Kc dual / Diogo Silveira Kersten.- 2018.
74 p.; 30 cm

Orientador: Reimar Carlesso
Coorientador: Mirta Teresinha Petry
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, RS, 2018

1. Evapotranspiração 2. Uso da água na agricultura 3. Coeficiente de cultivo I. Carlesso, Reimar II. Teresinha Petry, Mirta III. Título.

© 2018

Todos os direitos autorais reservados a Diogo Silveira Kersten. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: diogokerstenv@gmail.com

Diogo Silveira Kersten

**ESTIMATIVA DA DEMANDA HÍDRICA DA CULTURA DO MILHO IRRIGADO
NO SUL DO BRASIL UTILIZANDO IMAGENS ORBITAIS E K_c DUAL**

Tese de doutorado apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Ciência do Solo**.

Aprovado em 15 de maio de 2018

Reimar Carlesso Dr. (UFSM)
Presidente/Orientador

Mirta Teresinha Petry Dr^a. (UFSM)

Liane de Souza Weber Dr^a. (UFSM)

Cleudson José Michelon Dr. (IFFAR)

Juliano Dalcin Martins, Dr. (IFRS)

Santa Maria, RS
2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade da vida, de poder acordar a cada dia e iniciar uma nova caminhada, onde a cada momento nos deparamos com um novo desafio e com a possibilidade de vencer se persistir ou perecer se desistir.

Agradeço aos meus familiares, Olmir Richter Kersten e Jurumi Silveira Kersten, que me sustentaram até o momento oportuno, me auxiliando na educação e nos estudos com uma esperança de ter um filho com um futuro promissor, frente as dificuldades que muitos infelizmente passam.

Agradeço a minha esposa Michelli Freitas Mulling Kersten pela confiança, paciência e contribuições em todas as etapas do doutorado, seja na seleção, estudos rotineiros, correções e melhorias para alcançar um bom trabalho final.

Agradeço ao PPGCS pela oportunidade de dar continuidade aos meus estudos de Pós-Graduação em uma Instituição gratuita e de qualidade. Também o PPGCS proporciona ao corpo discente um aprendizado de suma importância para a conservação dos recursos naturais, com atenção ao sistema solo.

Agradeço ao Prof. Reimar Carlesso pela minha aceitação no Programa de Pós-Graduação, suas contribuições, correções e melhorias do trabalho, buscando resultados promissores que venham a contribuir de alguma maneira na gestão da irrigação.

Agradeço a professora Mirta Petry pelos ajustes, comentários e revisões dos artigos.

Sou grato pela colaboração dos colegas, integrantes do Sistema Irriga, que me auxiliaram nas correções e melhorias do trabalho, com especial atenção ao Robson Giacomelli, Bruno Montovanelli, Viviane Ávila, Max Dantas, Laudenir Basso, Cassiane Victoria, Leonardo Chechi.

Também agradeço ao Governo Federal pela política de apoio à graduação e pós-graduação no Brasil, seja por meio da criação de novas universidades, cursos e programas de financiamento das bolsas.

Bem-aventurado o homem que não anda segundo o conselho dos ímpios, nem se detém no caminho dos pecadores, nem se assenta na roda dos escarnecedores. Antes tem o seu prazer na lei do Senhor, e na sua lei medita de dia e de noite. Pois será como a árvore plantada junto a ribeiros de águas, a qual dá o seu fruto no seu tempo; as suas folhas não cairão, e tudo quanto fizer prosperará.

Salmos 1:1-3

RESUMO

ESTIMATIVA DA DEMANDA HÍDRICA DA CULTURA DO MILHO IRRIGADO NO SUL DO BRASIL UTILIZANDO IMAGENS ORBITAIS E Kc DUAL

AUTOR: Diogo Silveira Kersten
ORIENTADOR: Reimar Carlesso

O uso de imagens orbitais para dar suporte complementar ao manejo da água em sistemas agrícolas irrigados, com ênfase na estimativa dos coeficientes de cultivo, tem alcançado bons resultados, especialmente se associado com modelos de balanço hídrico do solo que estimam os parâmetros da irrigação para determinar a evapotranspiração da cultura (ETc). Essas informações podem apoiar o manejo da irrigação e serem organizadas em um sistema de informação geográfica (SIG), para visualização espacial da resposta espectral identificada pelo índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), podendo identificar a eficiência da atividade agrícola de forma a retratar a realidade local. A interação das informações obtidas pelo sensoriamento remoto com os resultados encontrados pelo modelo de balanço hídrico do solo permite o entendimento das características da cultura, do solo, da precipitação pluviométrica e da demanda de água pelas culturas. Desta maneira, o presente estudo tem como objetivo estimar os coeficientes de cultivo do milho, a partir do NDVI, dados obtidos pelo processamento das imagens do Sensor OLI (plataforma Landsat 8) e dados estimados pelo modelo de balanço hídrico do solo SIMDualKc, para determinar a demanda ETc. O estudo foi conduzido em três áreas irrigadas por pivô central no município de Júlio de Castilhos-RS, Brasil, nos anos agrícolas 2013/14, 2014/15 e 2016/17. Os coeficientes de cultivo avaliados foram: o coeficiente de cultura (Kc), o coeficiente de cultura basal (Kcb) e o coeficiente de evaporação da água no solo (Ke), estes estimados pelo modelo SIMDualKc. Os Kcb também foram estimados a partir do NDVI, obtidos pelo processamento das imagens do sensor OLI. Uma abordagem para estimar o Kc do NDVI foi proposta, integrando o Kcb obtido pelo NDVI com o Ke derivado pelo modelo SIMDualKc. A partir do Kc NDVI foi estimado a ETc com dados do NDVI para os três anos agrícolas avaliados, aplicando a fórmula $ETc = Kc * ETo$, onde a ETo é a evapotranspiração da cultura de referência. A metodologia proposta permitiu a obtenção dos coeficientes de cultivo com base no modelo SIMDualKc e a partir de informações das imagens satelitais para estimar a demanda ETc do milho nos três anos avaliados. Os resultados encontrados para as três áreas irrigadas demonstraram boas estimativas da relação dos Kcb e ETc, alcançados pelo NDVI, com os Kcb e ETc obtidos pelo modelo SIMDualKc.

Palavras-chave: evapotranspiração, uso da água na agricultura, coeficiente de cultivo, Sensor OLI.

ABSTRACT

ESTIMATION OF THE WATER DEMAND OF CULTURE OF IRRIGATED CORN IN SOUTHERN BRAZIL USING ORBIT IMAGES AND DUAL Kc

AUTHOR: Diogo Silveira Kersten

ADVISOR: Reimar Carlesso

The use of orbital images to provide complementary support to water management in irrigated agricultural systems, with an emphasis on the estimation of crop coefficients, has achieved good results, especially if associated with soil water balance models that estimate irrigation parameters to determine crop evapotranspiration (ET_c). This information can support irrigation management and be organized in a geographic information system (GIS), for spatial visualization of the spectral response identified by the normalized difference vegetation index (NDVI), and can identify the efficiency of the agricultural activity in order to portray the local reality. The interaction of the information obtained by the remote sensing with the results found by the soil water balance model allows the understanding of the characteristics of the crop, soil, rainfall and water demand by the crops. In this way, the present study aims to estimate the corn cultivation coefficients, from the NDVI, data obtained by the Sensor OLI image processing (Landsat 8 platform) and data estimated by the SIMDualKc soil water balance model, to determine the ET_c demand. The study was conducted in three central pivot irrigated areas in the municipality of Júlio de Castilhos-RS, Brazil, in the agricultural years 2013/14, 2014/15 and 2016/17. The cultivation coefficient (K_c), basal culture coefficient (K_{cb}) and soil water evaporation coefficient (K_e), estimated by the SIMDualKc model, were evaluated. The K_{cb} were also estimated from the NDVI, obtained by processing the Sensor OLI images. An approach to estimating K_c NDVI was proposed, integrating the K_{cb} obtained by the NDVI with the K_e derived by the model SIMDualKc. From the K_c NDVI was estimated with ET_c NDVI data for the three evaluated agricultural years, applying the formula $ET_c = K_c * ET_o$, where ET_o is the evapotranspiration of the reference crop. The proposed methodology allowed to obtain the cultivation coefficients based on the SIMDualKc model and from satellite imagery information to estimate the corn ET_c demand in the three years evaluated. The results for the three irrigated areas showed good estimates of the K_{cb} and ET_c ratio achieved by the NDVI, with the K_{cb} and ET_c obtained by the SIMDualKc model.

Keywords: Evapotranspiration, water use in agriculture, crop coefficient, Sensor OLI.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO I

Figura 01. Localização das áreas do estudo no município de Júlio de Castilhos - RS, Brasil. Os retângulos verdes ilustram a sobreposição das imagens do Sensor OLI de aproximadamente 15 km nas órbitas 222/80 e 223/80. Os pivôs estão identificados com as letras A, B e C. 22

Figura 02. Variação sazonal dos parâmetros de irrigação diários para a área irrigada A no ano agrícola 2013/14; área irrigada B no ano agrícola 2014/15; e área irrigada C para o ano agrícola 2016/17. Sendo: K_c – coeficiente de cultura, K_{cb} – coeficiente de cultura basal, K_e – coeficiente de evaporação da água no solo, E_{Tc} – evapotranspiração da cultura. Também são apresentadas as precipitações e as irrigações que ocorreram no ciclo. 33

Figura 03. Análise de dispersão dos resultados do K_{cb} obtido pelo NDVI com o K_{cb} estimado pelo modelo $SIMDualK_c$, para as áreas irrigadas A, B e C nos três anos agrícolas 2013/14, 2014/15 e 2016/17. 34

ARTIGO II

Figura 01. Localização das três áreas irrigadas por pivô central, denominadas A, B e C, inseridas em uma área de sobreposição das imagens do Sensor OLI, no município de Júlio de Castilhos – RS, Brasil. 45

Figura 2. Variação diária dos parâmetros de irrigação determinados pelo modelo $SIMDualK_c$ e pelo processamento de imagens satelitais para a área irrigada A no ano agrícola de 2013/14; área irrigada B para o ano agrícola de 2014/15; e área irrigada C para o ano agrícola 2016/17, respectivamente. Sendo: K_c - coeficiente de cultura; K_{cb} NDVI - coeficiente de cultura basal derivada do NDVI; K_e - coeficiente de evaporação da água do solo; K_{cb} - coeficiente de cultura basal; as barras verticais em azul indicam as irrigações aplicadas e as barras em vermelho as precipitações pluviais (mm). 55

Figura 03. Análise de dispersão dos resultados da E_{Tc} obtida pelo NDVI com a E_{Tc} estimada pelo modelo $SIMDualK_c$, para as áreas irrigadas A, B e C nos três anos agrícolas 2013/14, 2014/15 e 2016/17. 64

LISTA DE TABELAS

ARTIGO I

Tabela 01. Características físicas e hidráulicas dos solos encontrados nas três áreas irrigadas A, B e C no município de Júlio de Castilhos – RS, Brasil.	23
Tabela 02. Fases de desenvolvimento da cultura do milho, altura da planta e estádios fenológicos identificados para as três áreas irrigadas, no município de Júlio de Castilhos-RS, Brasil.....	24
Tabela 03. Componentes do balanço hídrico do solo para a cultura do milho nos três anos agrícolas 2013/14, 2014/15 e 2016/17, referente às três áreas irrigadas A, B e C no município de Júlio de Castilhos – RS, Brasil.	28
Tabela 04. Parâmetros da cultura e do solo calibrados e obtidos pelo processamento de imagens orbitais, na obtenção dos valores Kcb NDVI.	30
Tabela 05. Valores de Kcb estimados pelo modelo SIMDualKc e pelo processamento de imagens satelitais na obtenção dos valores de Kcb NDVI, para cada estágio fenológico, nas três áreas irrigadas.	31
Tabela 06. Indicadores de ajustamento aos dados encontrados pelo processamento de imagens satelitais na obtenção de valores de Kcb NDVI, com os resultados do Kcb estimados pelo modelo SIMDualKc para a cultura do milho, realizados nas três áreas irrigadas A, B e C, nos três anos analisados.	32

ARTIGO II

Tabela 01. Fases fenológicas, altura de planta e graus-dia acumulado identificados para as três áreas irrigadas no município de Júlio de Castilhos-RS, Brasil.....	47
Tabela 02. Características físicas e hidráulicas dos solos encontrados nas três áreas irrigadas: A, B e C.	48
Tabela 03. Kc estimados pelo modelo SIMDualKc e Kc calculados pelo NDVI para as três áreas irrigadas A, B e C, nos três anos agrícolas avaliados 2013/14, 2014/15 e 2016/17 no município de Júlio de Castilhos – RS, Brasil.	57
Tabela 04. Produtividade da água calculada para as três áreas irrigadas, nos três anos agrícolas 2013/14, 2014/15 e 2016/17.	59
Tabela 05. Graus dia acumulado (GDD), NDVI mín, NDVI máx e coeficiente de variação (CV) que foram realizados para os valores totais de NDVI para cada área irrigada, nos três ciclos culturais.	61
Tabela 06. Indicadores de ajustamento relativo para a ETc obtida pelo NDVI com a ETc estimada pelo modelo SIMDualKc, para as três áreas irrigadas no município de Júlio de Castilhos – RS, Brasil nos três anos agrícolas 2013/14, 2014/15 e 2016/17.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAE	Erro absoluto médio
ARE	Erro relativo médio (%)
ASW	Água disponível no solo (cm^3/cm^3)
b_0	Coefficiente de regressão
CC	Capacidade de campo (cm^3/cm^3)
CN	Curva número (escoamento superficial)
DAS	Dias após a sementeira
DP	Percolação profunda (mm)
Ds	Densidade aparente do solo (g/cm^3)
EF	Eficiência de modelagem
ETc	Evapotranspiração da cultura (mm)
ETo	Evapotranspiração de referência (mm)
fc	Fração de cobertura (%)
GDD	Graus-dia acumulado ($^{\circ}\text{C}$)
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
h	Altura da planta (m)
ID	Irrigação deficitária
NDVI	Índice de vegetação por diferença normalizada
Kc	Coefficiente de cultura
Kcb	Coefficiente de cultura basal
Kd	Coefficiente de densidade
Ke	Coefficiente de evaporação da água do solo
Ks	Coefficiente de estresse
IAF	Índice de área foliar
p	Fração de depleção da água no solo sem estresse
PBIAS	Porcentagem de viés
PMP	Ponto de murcha permanente (cm^3/cm^3)
R^2	Coefficiente de determinação
RAW	Água prontamente disponível (mm)
REW	Água facilmente evaporável (mm)
RMSE	Raiz quadrada do erro médio
RO	Escoamento superficial (mm)
SIG	Sistema de informação geográfica
TEW	Água evaporável total (mm)
TWU	Uso total de água (mm)
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>
IV	Índice de vegetação
WP	Produtividade da água (Kg/m^3)
WPirrig	Produtividade da água advinda apenas da irrigação (Kg/m^3)
Ya	Produtividade da cultura (kg/ha)
Ze	Camada evaporável do solo (m)

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	13
ARTIGO I – BALANÇO HÍDRICO DO SOLO E K_c DUAL DA CULTURA DO MILHO IRRIGADO POR PIVÔ CENTRAL USANDO SENSORIAMENTO REMOTO NO SUL DO BRASIL	18
RESUMO:	18
ABSTRACT:	19
1 INTRODUÇÃO	20
2 MATERIAL E MÉTODOS	21
2.1 Caracterizações do local, clima e solo	21
2.1.1 Dados de campo e informações climáticas	23
2.2 Imagens satelitais e processamento	25
2.3 SIMDual K_c	27
2.4 Análise estatística	27
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
3.1 Parâmetros do balanço hídrico	28
3.2 Parâmetros da cultura e do solo	30
4 CONCLUSÕES	36
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
ARTIGO II - EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DO MILHO IRRIGADO POR PIVÔ CENTRAL DERIVADO DO NDVI E APROXIMAÇÃO K_c DUAL NO SUL DO BRASIL	41
RESUMO:	41
ABSTRACT:	42
1 INTRODUÇÃO	43
2 MATERIAL E MÉTODOS	45
2.1 Caracterização do meio físico	45
2.1.1 Informações de campo e dados climatológicos.....	46
2.2 Modelo SIMDual K_c	48
2.3 Dados de sensoriamento remoto	49
2.4 Produtividade da água.....	52
2.5 Análise estatística	53
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
3.1 Estimativas dos coeficientes de cultivo do milho	54
3.2 Produtividade da cultura e produtividade da água	58
3.3 NDVI e graus-dia acumulado para a cultura do milho	60
4 CONCLUSÕES	65
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
DISCUSSÃO GERAL	70
CONCLUSÕES GERAIS	72
BIBLIOGRAFIA	73

APRESENTAÇÃO

A crescente demanda de recursos hídricos para atender as áreas agrícolas irrigadas no Brasil e no mundo tem incentivado profissionais, entidades acadêmicas e governamentais a desenvolverem metodologias para melhor quantificar as necessidades hídricas dos cultivos agrícolas. Essas metodologias normalmente necessitam de dados de campo, dados meteorológicos e mais recentemente no uso do sensoriamento remoto para monitorar, avaliar e estimar o uso da água em sistemas agrícolas em larga escala, contribuindo para a eficiência do uso da água, evitando o uso em excesso ou mesmo limitado, aos requisitos reais da demanda evapotranspirativa das culturas irrigadas (LI et al., 2017).

A demanda evapotranspirativa das culturas é um critério variável no tempo e espaço, relacionado ao manejo do solo empregado, características físicas e hidráulicas do solo, estágio vegetativo e condições meteorológicas locais (ALLEN et al., 1998). O método clássico para estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c) é a partir da equação ($ET_c = K_c * ET_o$) onde o coeficiente de cultura (K_c) é multiplicado pela evapotranspiração da cultura de referência (ET_o), demanda evaporativa da atmosfera independentemente do tipo de cultivo, a partir de dados climáticos (POPOVA e PEREIRA, 2011), que leva em consideração o K_c simples, parâmetro utilizado para representar as características da cultura com relação as suas necessidades hídricas, em condições ideais ou mesmo potenciais da planta, o que, muitas vezes não acontece em condições reais de produção agrícola, devido às adversidades ocasionadas pelo clima, competitividade da água e nutrientes com as plantas voluntárias, doenças e pragas que causam danos às plantas agrícolas, interferindo de alguma maneira na ET_c potencial (ALLEN et al., 2007, ER-RAKI et al., 2013).

Para o cálculo da ET_c pode ser adotada a metodologia do K_c dual, onde o K_c é dividido nos componentes do coeficiente de cultura basal (K_{cb}), referente a transpiração da cultura, e no coeficiente de evaporação da água no solo (K_e) (ALLEN et al., 1998; PEREIRA, 2004; ROSA et al., 2012). O procedimento utilizado pelo K_c dual é indicado para o planejamento da irrigação em tempo real, para cálculo do balanço de água no solo e para estudos de pesquisa, onde a variação da umidade na superfície do solo impacta na ET_c diária, esse conhecimento é necessário para realizar o manejo adequado da irrigação. Este é o caso onde há uma demanda frequente no uso da água para irrigação durante o ciclo cultural, como sistemas de gotejamento, micro irrigação, irrigação lateral, pivô central, dentre outros, que demandam dados diários dos parâmetros de irrigação como o K_c, o K_{cb}, o K_e, a percolação profunda (DP), o escoamento superficial (RO) e a ET_o para quantificar a lâmina de irrigação dos cultivos agrícolas.

O critério para estimativa da lâmina de irrigação para ambos os métodos, Kc simples ou Kc dual, depende da adequada seleção dos valores dos coeficientes de cultivo para cada estágio de desenvolvimento (inicial, intermediário e final), e também da estimativa da ETo. Existem diversos valores dos coeficientes de cultivo e extensões das fases de desenvolvimento das culturas padronizadas por Allen et al. (1998), porém, esses valores necessitam ser ajustados de acordo com as características locais, já que são influenciados por fatores como tipo de solo, manejo, variedade cultural e o clima. Essa adequação as condições locais podem ser realizadas a partir de modelos de balanço hídrico do solo que utilizam dados da cultura, do solo e do clima na aproximação dos parâmetros da irrigação, evitando a ocorrência de erros na estimativa da ETc (ODHIAMBO e IRMAK, 2012).

O SIMDualKc é um exemplo de modelo de balanço hídrico do solo que tem por finalidade o planejamento e a programação da irrigação, que utiliza a abordagem do Kc dual para a estimativa da ETc de um solo cultivado (ROSA et al., 2012). Este é um dos modelos que é aplicado para estimar a ETc e aferir o Kc de muitas culturas anuais e perenes, com vistas a encontrar a lâmina de irrigação em diferentes sistemas de irrigação e manejo da água e do solo (PAREDES et al., 2014).

A inclusão das características do solo como a granulometria, a umidade na capacidade de campo (CC), a umidade no ponto de murcha permanente (PMP) e dados do ciclo da cultura, são fundamentais para realizar a calibração do modelo SIMDualKc e aperfeiçoar os parâmetros do solo como o Ke, a DP, e a curva número (CN), do mesmo modo os parâmetros da cultura como o Kcb, o Kc e a fração de depleção da água no solo (p) em relação aos estágios de desenvolvimento da cultura. Desta maneira, o modelo SIMDualKc proporciona estimar os coeficientes de cultivo mais próximos a realidade local, pela calibração com dados de solo e cultura local, na obtenção da ETc (ROSA et al., 2012; PAREDES, et al., 2014; PEREIRA et al., 2015).

No sistema solo, conhecer e compreender a dinâmica dos fluxos da água é uma das etapas que vem se destacando nas pesquisas agronômicas, principalmente no que se refere a sua capacidade de armazenamento da água próximo à zona radicular, que determina a possível disponibilidade para absorção e posteriormente transpiração da cultura. A capacidade de retenção da água no solo é dependente das características físicas (microporos e mesoporos), hidráulicas (condutividade hidráulica) e topográficas do solo (efeito das relações solo-paisagem), somadas as precipitações pluviométricas e as irrigações. Estas características definem o armazenamento da água no solo e disponibilidade às plantas no tempo e espaço, os quais estão relacionadas às variáveis dos ciclos hidrológicos (ERLANDSSON et al., 2016).

As variáveis do ciclo hidrológico são usualmente de difícil mensuração devido ao número de parâmetros a serem identificados ou quantificados, tais como a declividade, tipo de solo, cobertura vegetal, clima, drenagem superficial, etc., porém, há modelos como o SWAT (*Soil water assessment tool*), que foi elaborado para simular o comportamento da água de superfície, interações de águas subterrâneas e a água no solo (WHITE et al., 2011); como o GlobWat (*Global water balance model*), utilizado pela FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) para avaliar o uso da água na agricultura irrigada no mundo. Estes modelos são exemplos de ferramentas para estimar o uso dos recursos hídricos na gestão da produção agrícola, em larga escala.

O manejo adequado da água nos sistemas agrícolas pode ser realizado a partir de dados como: índice de área foliar (IAF), altura da planta (h), fração de cobertura (f_c), umidade no solo, profundidade radicular, características físicas e hidráulicas do solo, estádios fenológicos, os quais servem de parâmetros de entrada em modelos de balanço hídrico do solo para estimativa da ETc (ROSA et al., 2012; PEREIRA et al., 2015). Outra maneira de avaliar o uso da água em sistemas agrícolas irrigados é através do uso dos cenários da irrigação, utilizando os indicadores de produtividade da água, como a produtividade total da água (WP), que relaciona a produtividade média das culturas com o volume total de água utilizada por elas, ou pela produtividade da água da irrigação (WPirrig) que relaciona a produtividade das culturas com a lâmina de água advinda apenas da irrigação (RODRIGUES & PEREIRA, 2009).

A estimativa da WP e da WPirrig podem ser aplicadas para regiões úmidas, semiúmidas, áridas, semiáridas, com baixos índices pluviométricos ou em regiões com distribuição irregular de chuvas, onde usualmente é utilizada a irrigação deficitária (ID), devido às limitações dos recursos hídricos. A ID consiste na aplicação de lâminas de irrigação inferiores às necessárias para satisfazer as demandas potenciais das culturas, esse fator gera implicações na evapotranspiração e na produtividade das culturas. Desta maneira, é importante planejar o manejo da água de irrigação, onde é utilizada a ID, para manter uma produtividade mínima das culturas e aumentar a eficiência do uso da água (PEREIRA et al., 2012).

Estimativas do uso da água na agricultura também podem ser obtidas através de estudos com índice de vegetação (IV), derivados da assinatura espectral da vegetação na faixa do infravermelho próximo e faixa do vermelho visível, que usualmente é utilizado o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). Os dados de NDVI podem ser obtidos pelo processamento digital das imagens satelitais, onde os NDVI são relacionados aos estádios de desenvolvimento e cobertura da vegetação no tempo e espaço (WANG et al., 2007; SCHNUR et al., 2010; PÔÇAS et al., 2014, 2015). Obtendo-se assim, uma medida indireta da absorção

da assinatura espectral na faixa do vermelho visível pela clorofila (a e b) e, pela refletância da assinatura espectral na estrutura mesofílica das folhas, na faixa do infravermelho próximo (GLENN et al., 2011).

O avanço no uso de imagens satelitais tem alcançado bons resultados para elaborar as imagens de NDVI, que são medições radiométricas adimensionais que indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação, incluindo o IAF, porcentagem de cobertura vegetal, teor de clorofila, biomassa verde e radiação fotossintética ativa, mostrando-se eficiente em estudos para avaliação do uso da água pelas culturas no tempo e espaço, o que propicia também a determinação de seus coeficientes de cultivos nas áreas agrícolas (BASTIAANSEN et al., 2005; ALLEN et al., 2007, DROOGERS et al., 2010, KAMBLE et al., 2013).

O uso do processamento digital de imagens orbitais, para realizar o monitoramento e a gestão da irrigação, oferece um grande potencial devido à natureza temporal e espacial das imagens satelitais, além de estas estarem disponíveis em *sites* específicos para cada satélite. No entanto, trabalhos que utilizaram a detecção remota para mapear e estimar as lâminas de irrigação nas áreas irrigadas por pivô central ainda estão em expansão, em razão da complexidade associada à tentativa de mapear o uso e manejo da água com dados da cultura. A detecção de dados quantitativos da irrigação, a partir de dados de sensoriamento remoto, requer o conhecimento do manejo da irrigação em lâmina somado aos dados pluviométricos locais, para aferição dos dados estimados por sensoriamento remoto (CALERA et al., 2017).

As informações obtidas por sensoriamento remoto constituem uma ferramenta promissora para estudos hidrológicos em áreas agrícolas, despertando o interesse de empresas de monitoramento e gestão do uso da água, agências reguladoras e comitês de bacias hidrográficas. Sendo uma alternativa em potencial para conhecer e regular o uso da água em regiões agrícolas, reduzindo os custos com aquisição de equipamentos (hidrômetros, sensores de umidade, molinete hidrométrico, receptores de sinal GNSS, entre outros), e a necessidade de mão de obra especializada, em nível de campo, para realizar avaliações periódicas a fim de obter dados quantitativos da água utilizada (FOLHES et al., 2009; FOOLAD et al., 2017).

Dentre os problemas que são causados pelo uso inadequado da água na agricultura irrigada, pode-se citar o uso da água em excesso, que causa a lixiviação de insumos, erosões do solo, gastos desnecessários de energia, dentre vários outros fatores econômicos e ambientais relacionados aos sistemas produtivos agrícolas. Por outro lado, a irrigação quando aplicada em quantidades inferiores a demandada pela cultura, ocasiona diminuição na produção com impacto econômico a atividade agrícola. Sendo de inteira necessidade a estimativa da ETc mais próxima a campo para calcular a lâmina de irrigação no sistema em todo o ciclo cultural. Este

estudo propõe a estimativa dos coeficientes de cultivo, a partir de dados do sensoriamento remoto combinados com os resultados obtidos por um modelo de balanço hídrico do solo, para determinar a ET_c do milho em sistemas produtivos irrigados, que atenda a necessidade hídrica da cultura e a capacidade de retenção da água no solo, na obtenção de maiores produtividades e adequação ao uso prudente dos recursos hídricos.

Desta maneira, o presente estudo tem como objetivos: I) Avaliar o uso do NDVI, obtido pelo processamento de imagens satelitais, e do o modelo de balanço hídrico do solo para obtenção dos coeficientes de cultivo, na estimativa da ET_c do milho em sistemas irrigados por pivô central. II) Avaliar os cenários da irrigação utilizando os indicadores de produtividade da água como a WP e a WPirrig. Contribuindo diretamente para o melhor ajuste dos parâmetros que estimam a lâmina de irrigação com a demanda evapotranspirativa da cultura, possibilitando o uso racional da água em sistemas produtivos agrícolas no Sul do Brasil, além de se gerar expectativas com resultados futuros com a expansão do seu uso em áreas irrigadas a nível nacional.

ARTIGO I – BALANÇO HÍDRICO DO SOLO E K_c DUAL DA CULTURA DO MILHO IRRIGADO POR PIVÔ CENTRAL USANDO SENSORIAMENTO REMOTO NO SUL DO BRASIL

RESUMO: O uso de informações obtidas por imagens satelitais fornece dados regularmente distribuídos em grandes áreas geográficas sobre a dinâmica temporal real da vegetação, através do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), que pode ser utilizado para calcular os parâmetros de irrigação em cultivos agrícolas. Há metodologias que adotam como base o boletim FAO-56 para estimar os coeficientes de cultivo, que propõe a divisão do coeficiente de cultura (K_c) em coeficiente de cultura basal (K_{cb}) e coeficiente de evaporação da água no solo (K_e), ao longo do ciclo da cultura por proporcionar parâmetros que identificam a transpiração da cultura e a evaporação da água na superfície do solo mais próximas da realidade de campo. Desta maneira, o presente estudo tem por objetivos estimar os K_{cb} do milho a partir do processamento digital das imagens do Sensor OLI, plataforma Landsat 8, e pelo modelo de balanço hídrico do solo SIMDualK_c. Com o modelo SIMDualK_c também será estimado os componentes do balanço hídrico do solo, separando a evapotranspiração da cultura (ET_c) em evaporação da água do solo e transpiração da cultura, avaliando assim a relevância de cada parâmetro estimado com base em dados de campo e dados meteorológicos. O estudo foi conduzido no município de Júlio de Castilhos – RS, Brasil, em três áreas irrigadas por pivô central nos anos agrícolas de 2013/14, 2014/15 e 2016/17. As avaliações realizadas em nível de campo foram: identificação da fenologia vegetal, altura da planta, precipitações, irrigações, somadas as informações meteorológicas locais e amostras de solo. Com estas informações, estimaram-se os componentes do balanço hídrico do solo pelo modelo SIMDualK_c em cada área irrigada. Utilizaram-se também as imagens do Sensor OLI para calcular o NDVI e encontrar os K_{cb} nos três estádios fenológicos da cultura (inicial, intermediário e final) para os três anos agrícolas. A partir dos resultados encontrados pelos indicadores estatísticos, para a relação entre os K_{cb} calculados pelo NDVI e os K_{cb} estimados pelo modelo SIMDualK_c, pode-se destacar o valor de 0,97, para o coeficiente de determinação (R²), expressando que a maior parte da variância dos valores estimados pelo processamento das imagens satelitais é explicada pelos valores encontrados pelo modelo SIMDualK_c. A estimativa do K_{cb} obtido pelo NDVI vem ser uma alternativa para identificar a disponibilidade da água no solo às plantas, através das imagens satelitais, de tal modo que possa trazer melhorias e adequações no manejo da água em sistemas agrícolas irrigados no Sul do Brasil.

Palavras-chave: Demanda transpirativa da cultura, imagens do Sensor OLI, manejo da irrigação, SIMDualK_c.

ARTICLE I - WATER BALANCE OF SOIL AND K_c DUAL OF CORN CULTURE IRRIGATED BY CENTRAL PIVOT USING REMOTE SENSING IN SOUTH OF BRAZIL

ABSTRACT: The use of information obtained by satellite images provides data regularly distributed over large geographic areas on the actual temporal dynamics of vegetation through the normalized difference vegetation index (NDVI), which can be used to calculate the irrigation parameters in agricultural crops. There are methodologies based on FAO-56 to estimate crop coefficients, which proposes the division of the crop coefficient (K_c) into basal crop coefficient (K_{cb}) and soil water evaporation coefficient (K_e), throughout the crop cycle by providing parameters that identify the transpiration of the crop and the evaporation of water at the soil surface closer to the field reality. In this way, the present study aims to estimate the K_{cb} of maize from the digital processing of the Sensor OLI images, Landsat platform 8, and by the soil water balance model SIMDualKc. The SIMDualKc model will also estimate the soil water balance components, separating crop evapotranspiration (E_{Tc}) in soil water evaporation and transpiration of the crop, thus evaluating the relevance of each parameter estimated based on field data and data meteorological conditions. The study was conducted in the municipality of Júlio de Castilhos - RS, Brazil, in three central pivot irrigated areas in the agricultural years of 2013/14, 2014/15 and 2016/17. The field level evaluations were: identification of plant phenology, plant height, rainfall, irrigation, local meteorological information and soil samples. With this information, the soil water balance components were estimated by the SIMDualKc model in each irrigated area. The images of the Sensor OLI were used to calculate the NDVI and to find the K_{cb} in the three phenological stages of the crop (initial, intermediate and final) for the three agricultural years. From the results found by the statistical indicators, for the relationship between the K_{cb} calculated by the NDVI and the K_{cb} estimated by the SIMDualKc model, one can highlight the value of 0,97 for the coefficient of determination (R^2), expressing that the highest part of the variance of the values estimated by the processing of the satellite images is explained by the values found by the SIMDualKc model. The estimation of K_{cb} obtained by the NDVI is an alternative to identify the availability of water in the soil to the plants through satellite images, in such a way that it can bring about improvements and adaptations in the water management in irrigated agricultural systems in the South of Brazil.

Keywords: Transpiratory demand of culture, Sensor OLI images, irrigation management, SIMDualKc.

1 INTRODUÇÃO

A evapotranspiração pode ser separada nos componentes da evaporação da água no solo e na transpiração da vegetação. A transpiração está relacionada ao crescimento e produtividade das culturas, uma vez que ocorre simultaneamente com a fotossíntese, através dos poros estomáticos das folhas, na maioria das culturas, e sua demanda hídrica deve ser atendida pela água no solo em todo ciclo (PIERUSCHKA et al., 2010). Em contrapartida, a evaporação da água no solo não é um fator que contribui para a produção agrícola, e deve ser reduzida por meio de práticas de gestão, por exemplo, estratégias de manejo do solo e irrigação adequados a realidade local, como também o uso de resíduos culturais que abreviem a evaporação, como o *mulching* (ALLEN et al., 2000; ZHAO et al., 2010; DING et al., 2013; SICZEKA et al., 2015).

Considerando que a evaporação e a transpiração ocorrem simultaneamente, e que não há uma maneira fácil de separá-las, devem ser adotadas metodologias de particionamento que identifiquem e quantifiquem a evaporação da água no solo e a transpiração das plantas em todo ciclo cultural avaliado. Para que ocorra o processo da transpiração e da evaporação é necessário o fornecimento de energia, de gradiente de pressão, de vapor e do vento. Por conseguinte, termos da radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento devem ser considerados quando se estima a evapotranspiração, para melhor avaliar a produtividade e a eficiência no uso da água em sistemas agrícolas (ALLEN et al., 1998; PAREDES et al., 2015^a; PEREIRA et al., 2015; TOUMI et al., 2016).

O manejo adequado da água em sistemas agrícolas é essencial para que as demandas hídricas das culturas sejam atendidas de maneira eficiente por agricultores, pesquisadores, engenheiros e técnicos envolvidos na gestão do uso da água. Desta maneira, faz-se necessário o conhecimento dos dados científicos calculados a partir de metodologias que possam identificar e quantificar as principais variáveis envolvidas no sistema solo-planta-atmosfera. Neste sentido, modelos de balanço hídrico do solo como o SIMDualKc e o AquaCrop que estimam a evapotranspiração das culturas agrícolas com base em dados de solo, planta e clima, mostram-se eficientes no manejo da água em sistemas agrícolas irrigados (ALLEN et al., 1998; RAES et al., 2009; GIMÉNEZ et al., 2016).

O SIMDualKc é um modelo que estima o balanço hídrico de um solo cultivado e tem como principal objetivo o planejamento e a programação da irrigação, usando a abordagem do coeficiente de cultura (Kc) dual para a estimativa da evapotranspiração da cultura (ETc), onde o Kc pode ser calculado ($Kc = Kcb + Ke$), onde o Kcb é o coeficiente de cultura basal, e o Ke representa o coeficiente de evaporação da água no solo. O modelo SIMDualKc considera os

impactos da cobertura superficial do solo, como *mulching*, sobre a restrição da evaporação da água no solo, o que pode gerar aumento da transpiração total da cultura e redução da quantidade de energia disponível à superfície do solo para a evaporação; além disso, o *mulching* auxilia no controle da erosão e no aumento da infiltração da água no solo (ROSA et al., 2012).

Nas últimas décadas houve uma crescente utilização do sensoriamento remoto em combinação com modelos de balanço hídrico do solo para estimar as demandas hídricas das culturas agrícolas. A abordagem do Kc dual possui vantagens quando da aplicação de imagens orbitais para estimar a transpiração da cultura, isso ocorre devido os métodos baseados no índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) possuírem uma boa correspondência com o Kcb, que representa a transpiração da cultura, porém este método não reflete de forma adequada o processo de evaporação da água no solo, que precisa ser estimado por avaliações a campo ou por modelos de balanço hídrico do solo (ALLEN et al., 1998, 2011; CAMPOS et al., 2012; CALERA et al., 2017).

A aproximação do NDVI com o Kcb baseia-se na correlação entre o índice de vegetação (IV) com parâmetros biofísicos das plantas, incluindo o índice de área foliar (IAF), atividade fotossintética, estádios de desenvolvimento da cultura e a própria transpiração da cultura (GLENN e NEALE, et al., 2011; JOHNSON e TROUT, 2012).

Desta maneira, o presente estudo tem como objetivos: (I) Estimar os Kcb do milho a partir do processamento de imagens satelitais e pelo modelo de balanço hídrico do solo nos três estádios principais da cultura (inicial, intermediário e final); (II) Estimar os parâmetros que compõe o balanço hídrico do solo, separando a ETc em evaporação da água do solo e transpiração da cultura, avaliando a relevância de cada componente estimado com dados de campo e dados meteorológicos em três áreas irrigadas por pivô central.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterizações do local, clima e solo

O presente estudo foi conduzido na Agropecuária Cechin, propriedade localizada na região do Planalto Médio do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, município de Júlio de Castilhos, localizada na latitude 29°11'53" Sul, longitude 53°36'21" Oeste, estando a uma altitude média de 407 metros. A região do estudo caracteriza-se por uma extensiva produção agrícola e também por áreas irrigadas com cultivo da soja, trigo, milho, canola.

O clima é classificado como Cfa, subtropical úmido, com precipitação média anual de 1.755 mm (KUINCHTNER e BURIOL, 2001). Neste estudo foram analisadas três áreas irrigadas por pivô central, sendo denominada área A, localizada na latitude 29°11'33.7" Sul e longitude 53°36'9.3" Oeste, área B localizada na latitude 29°11'14.2" Sul e longitude 53°36'27.2" Oeste, e área C localizada na latitude 29°10'2.0" Sul e longitude 53°34'56" Oeste, onde cobriram uma área de 76,8ha, 17,2ha e 30,7ha respectivamente (Figura 01).

Os anos agrícolas estudados foram 2013/14, 2014/15 e 2016/17, sendo as três áreas cultivadas com milho, sob o sistema de plantio direto, com uma população aproximada de 85 mil plantas por hectare. A classificação do solo para as três áreas irrigadas é denominada como Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico (úmbrico), segundo Streck et al. (2008).

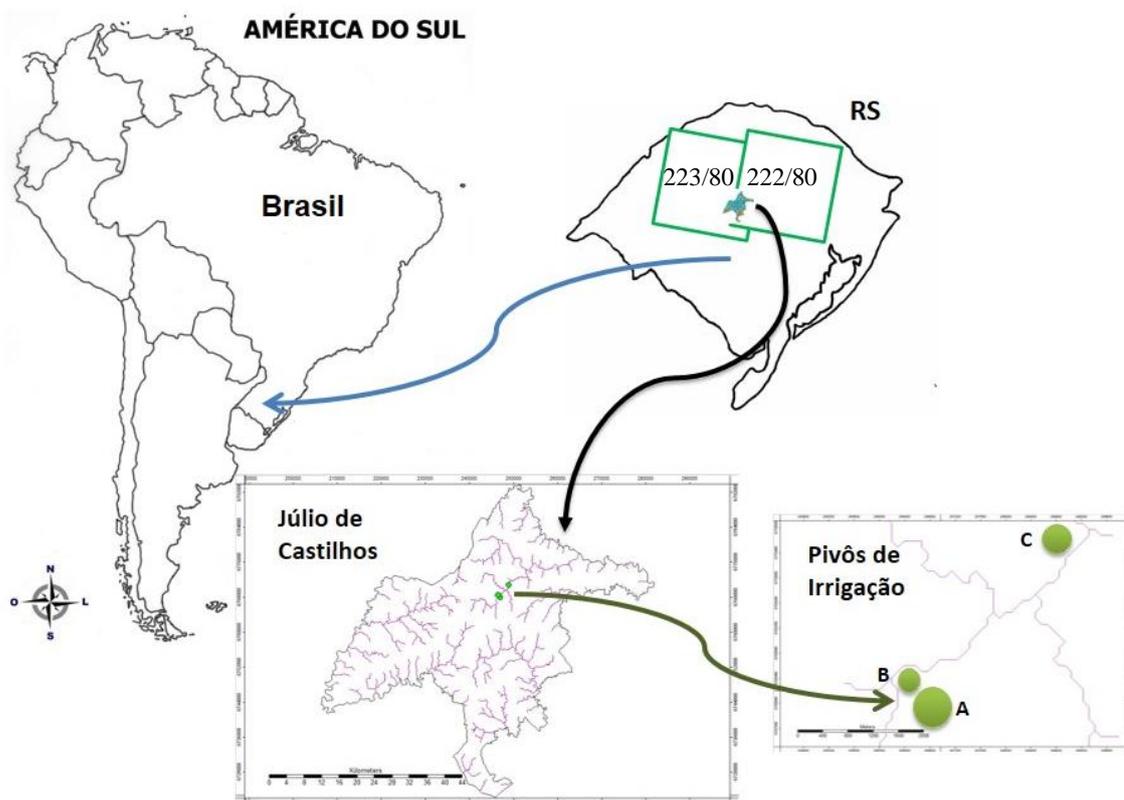


Figura 01. Localização das áreas do estudo no município de Júlio de Castilhos - RS, Brasil. Os retângulos verdes ilustram a sobreposição das imagens do Sensor OLI de aproximadamente 15 km nas órbitas 222/80 e 223/80. Os pivôs estão identificados com as letras A, B e C.

A seguir são apresentadas, na Tabela 01, as características físicas e hidráulicas do solo para as três áreas irrigadas A, B e C determinadas no laboratório de solos do Sistema Irriga[®] - UFSM, sistema que realiza a gestão da irrigação na região do estudo.

Tabela 01. Características físicas e hidráulicas dos solos encontrados nas três áreas irrigadas A, B e C no município de Júlio de Castilhos – RS, Brasil.

Camada (m)	Textura			Classe textural	Umidade	
	Areia	Silte (%)	Argila		CC	PMP cm ³ /cm ³
Área Irrigada A						
0,00 – 0,25	40	35	25	Franco	0,361	0,170
0,25 – 0,50	34	37	29	Franco argiloso	0,356	0,170
0,50 – 0,70	30	38	32	Franco argiloso	0,357	0,180
Área Irrigada B						
0,00 – 0,25	35	40	25	Franco	0,316	0,170
0,25 – 0,50	26	43	31	Franco argiloso	0,379	0,180
0,50 – 0,70	22	43	35	Franco argiloso	0,392	0,190
Área Irrigada C						
0,00 – 0,25	49	24	27	Franco argilo arenoso	0,292	0,160
0,25 – 0,50	42	28	30	Franco argiloso	0,288	0,150
0,50 – 0,70	39	30	31	Franco argiloso	0,316	0,190

As amostras de solo coletadas até a profundidade de 0,70 m, em cada área irrigada, foram submetidas à metodologia descrita por Michelon et al. (2010) para obter informações do solo na capacidade de campo, onde as amostras são inseridas no extrator de água idealizado por Richards (1949), em que obteve-se o teor de água no solo para o potencial de -10 kPa. Para obter informações do teor de água no solo no ponto de murcha permanente, para o potencial de -1500kPa, foi determinado utilizando amostras de solo com estrutura deformada, em câmaras de um potenciômetro de ponto de orvalho, WP4 (marca: DECAGON, Devices, Inc).

2.1.1 Dados de campo e informações climáticas

A fenologia da cultura do milho, avaliada quinzenalmente por técnicos do Sistema Irriga[®], foi realizada por meio da identificação visual do desenvolvimento da planta a partir das fases vegetativas e reprodutivas (Ve, V1, V2, V3, Vn, Vt, R1, R2...R6), conforme metodologia de Ritchie et al. (1993), e pela medição da altura das plantas do milho em pontos representativos das três áreas irrigadas, também foram identificados o desenvolvimento radicular do milho. As precipitações pluviais e irrigações das áreas estudadas foram registradas pelo agricultor nos três anos agrícolas. Os dados a campo foram inseridos no banco de dados do Sistema Irriga[®], esses dados são base para calcular os coeficientes de cultivo e definir a lâmina de irrigação pelo sistema de balanço hídrico do solo.

A seguir, são apresentados os dados a campo para as três áreas irrigadas como as fases que determinam os estádios de desenvolvimento da cultura (inicial, desenvolvimento rápido, intermediário e final), altura da cultura e a fenologia para os três anos agrícolas avaliados (Tabela 02).

Tabela 02. Fases de desenvolvimento da cultura do milho, altura da planta e estádios fenológicos identificados para as três áreas irrigadas, no município de Júlio de Castilhos-RS, Brasil.

Ano Agrícola 2013/2014				Ano Agrícola 2014/2015			Ano Agrícola 2016/2017		
Área irrigada A									
Fases	Data	h (m)	Fen.	Data	h (m)	Fen.	Data	h (m)	Fen.
Inicial	07/09/13	0,0	V0	21/08/14	0,0	V0	23/08/16	0,0	V0
Des. rap	07/10/13	0,5	V3	20/09/14	0,3	V3	03/10/16	0,3	V4
Médio	28/11/13	2,2	VT	13/11/14	2,1	VT	17/11/16	2,0	VT
Final	14/01/14	2,3	R6	01/01/15	2,2	R6	27/12/16	2,2	R5
Área irrigada B									
Inicial	07/09/13	0,0	V0	21/08/14	0,0	V0	23/08/16	0,0	V0
Des. rap	11/10/13	0,6	V3	22/09/14	0,2	V3	02/10/16	0,4	V4
Médio	27/11/13	2,0	VT	13/11/14	2,0	V14	18/11/16	2,1	VT
Final	13/01/14	2,3	R6	31/12/14	2,2	R6	24/12/16	2,2	R5
Área irrigada C									
Inicial	10/09/13	0,0	V0	22/08/14	0,0	V0	26/08/16	0,0	V0
Des. rap	15/10/13	0,5	V3	22/09/14	0,2	V3	06/10/16	0,3	V4
Médio	29/11/13	2,1	VT	10/11/14	1,9	V14	15/11/16	2,0	VT
Final	11/01/14	2,2	R5	31/12/14	2,2	R5	25/12/16	2,2	R5

Onde: Fases – identifica as fases de desenvolvimento da cultura; Data – data do início de cada fase de desenvolvimento; h - altura da planta (m); e Fen. – estágio fenológico da cultura do milho, Ritchie et al. (1993).

As fases de desenvolvimento do milho foram determinados de acordo com Allen et al. (1998), sendo: (i) fase inicial, da semente até o dossel da planta cobrir aproximadamente 10% da superfície do solo; (ii) fase de desenvolvimento rápido, de 10% de cobertura do solo até a cultura atingir a cobertura plena; (iii) fase intermediária, a partir da cobertura plena até o início da maturação; e (iv) fase final de desenvolvimento, da maturação fisiológica da cultura do milho até a colheita.

Os dados climáticos diários utilizados neste estudo foram: umidade relativa do ar, temperatura do ar, velocidade do vento, radiação solar e a pressão atmosférica, estes obtidos pela estação oficial do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET - A886). Os dados climáticos são empregados para estimar a evapotranspiração da cultura de referência (ET_o), utilizando o método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

2.2 Imagens satelitais e processamento

As imagens utilizadas neste estudo foram do Sensor OLI, plataforma Landsat 8, produtos de Nível 1 (L1T), obtidas da *United States Geological Survey* (USGS). Foram selecionadas as imagens com baixo e nulo índice de cobertura de nuvens sobre as três áreas do estudo, onde cobriram os três anos agrícolas com a cultura do milho. Com essas características obtiveram-se 23 imagens nas órbitas 222/80 e 223/80, sendo seis para o ano agrícola 2013/14: 13/09/2013, 08/10/2013, 16/11/2013, 25/11/2013, 18/12/2013 e 19/01/2014; dez datas para o ano agrícola 2014/15: 24/08/2014, 09/09/2014, 16/09/2014, 25/09/2014, 02/10/2014, 27/10/2014, 28/11/2014, 05/12/2014, 06/01/2015 e 22/01/2015; e sete datas para o ano agrícola 2016/17: 14/09/2016, 21/09/2016, 07/10/2016, 23/10/2016, 24/11/2016, 04/01/2017 e 11/01/2017.

A existência de uma área de sobreposição de aproximadamente 15 km sobre as duas órbitas na área de estudo (Figura 01), permitiu adquirir maior número de imagens, possibilitando reduzir a resolução temporal do sensor que é de 16 dias, obtendo desta maneira maior número de informações satelitais para cada ciclo cultural.

Para realizar o processamento das imagens satelitais, utilizado para extrair informações da cultura durante seu desenvolvimento, foi utilizado um sistema de informação geográfica (SIG), neste estudo foi definido o SAGA GIS (Sistema de Análise Geocientífica Automática), que foi desenvolvido na Universidade de Goettingen, na Alemanha (BÖHNER et al., (2006)), onde foram utilizadas as bandas espectrais B4 – banda do vermelho visível (0,64 – 0,67 μm), e B5 – banda do infravermelho próximo (0,85 – 0,88 μm) com resolução espacial de 30m do Sensor OLI, para gerar as imagens do NDVI em cada dia que obteve-se as imagens sobre as áreas irrigadas.

Após a aquisição das imagens satelitais com cobertura nos três ciclos culturais foram realizados, com o SAGA GIS, os redimensionamentos de nível digital (valores brutos da imagem) para refletância (valores físicos), conforme metodologia adotada por Li et al. (2016); também foi realizada a correção atmosférica em cada imagem, pelo método simplificado proposto por Chavez et al. (1988).

As propriedades da refletância espectral definem a intensidade da resposta de cada pixel em uma determinada banda para o alvo de interesse, neste caso para as áreas irrigadas por pivô central, na obtenção de informações que caracterizem o comportamento das plantas no tempo e espaço. A partir dos resultados encontrados pela refletância nas áreas de estudo, foi realizada a correção atmosférica, para sim poder realizar os cálculos e encontrar os valores médios do

NDVI em cada área irrigada, a partir das bandas B4 e B5 do Sensor OLI (ROUSE et al., 1974).

Utilizando a equação de Rouse et al. (1974) com as bandas B4 e B5, obtiveram-se as imagens do NDVI para as três áreas irrigadas durante os três anos agrícolas. A partir das imagens do NDVI, foram realizadas as secções dos limites das áreas irrigadas em cada pivô, o que proporcionou a obtenção de uma matriz de dados para cada área estudada, desconsiderando a borda dos pixels devido interferência da vegetação externa adjacente a área agrícola. Desta maneira, alcançaram-se os valores médios de NDVI em cada área irrigada, os quais foram inseridos nas equações propostas para obter valores médios do Kcb NDVI para os três estádios fenológicos (inicial, intermediário e final), durante os três ciclos do milho estudados.

Para obter estimativas dos valores do Kcb NDVI foram utilizados os valores médios do NDVI para cada data da passagem do satélite, em cada área irrigada. As equações utilizadas para obter os dados de Kcb pelo NDVI basearam-se na metodologia proposta por Pôças et al. (2015).

$$Kcb\ NDVI = Kcmin + Kd \left(\frac{Vli - Vimin}{VImax - Vimin} \right) \quad (01)$$

Onde: *Kcmin* é o mínimo valor de Kc para o solo nu (na ausência de vegetação). O valor de *Kcmin* é de 0,15 em condições agrícolas típicas (ALLEN et al, 2009); *Kd* é o coeficiente de densidade que permite incorporar o impacto da densidade e altura da vegetação na estimativa de Kcb; *Vli* corresponde ao NDVI médio para uma data de imagem satelital; *VImax* é o NDVI para a cobertura vegetal máxima (estádio vegetativo intermediário), ajustado para 0,85 para as três áreas agrícolas; e *Vimin* é o NDVI para cobertura mínima da vegetação ou solo desnudo, ajustado para 0,15 neste estudo, com base em resultados obtidos por Calera et al. (2004, 2017) e Madugundu et al. (2017).

A utilização do coeficiente de densidade (*Kd*) na equação do Kcb NDVI permite inserir dados reais da planta, como a fração coberta pela vegetação (*fc*) e altura da planta (*h*), para estimativa da transpiração da cultura com base em índice de vegetação. Onde Allen e Pereira (2009) propuseram a equação do *Kd* apresentada na equação 02 a seguir:

$$Kd = \min \left(1, Ml\ fc\ eff, fc\ eff^{\left(\frac{1}{1+h} \right)} \right) \quad (02)$$

Onde: *fc eff* é a fração da superfície do solo efetivamente coberta ou sombreada pela vegetação [0.01 - 1] próximo do meio-dia solar, *h* é a altura da cultura (m), e *Ml* é um multiplicador de *fc eff* que descreve o efeito da densidade do copado no sombreamento e no valor máximo da ET por fração de solo sombreado.

2.3 SIMDualKc

A aplicação do modelo SIMDualKc possibilita estimar o balanço hídrico do solo em escala diária, pela metodologia do Kc dual (Allen et al., 1998, 2005), e avançar no entendimento da dinâmica da água no solo para a cultura de interesse.

O modelo SIMDualKc, para realizar a simulação do balanço hídrico do solo, necessita de dados observados como altura da planta, f_c , lâminas de irrigação, precipitação, profundidade do sistema radicular, estádios vegetativos, granulometria do solo, como também de dados não observados, os quais se referem a parâmetros da cultura, como os Kcb e a fração de depleção sem estresse (p); além dos parâmetros que caracterizem a evaporação de água do solo como a água evaporável total (TEW), a água facilmente evaporável (REW) e a camada evaporável do solo (Z_e); e, por fim, parâmetros para estimar a percolação profunda (aD e bD), estes descritos por Liu et al. (2006).

Neste estudo foram utilizados, no modelo SIMDualKc, dados de campo como: altura da planta, f_c , lâminas de irrigação, precipitação, profundidade do sistema radicular, estádios vegetativos, granulometria dos solos, informações disponibilizadas pelo banco de dados do Sistema Irriga[®]; informações climáticas locais; como também parâmetros já calibrados de Giménez et al. (2016) para a cultura do milho irrigado, sendo: Kcb, p , REW, TEW, K_e , e aD e bD descritos por Liu et al. (2006).

2.4 Análise estatística

Para avaliar a precisão dos resultados encontrados pelo NDVI comparativamente aos valores estimados pelo modelo SIMDualKc, na predição dos valores de Kcb, foram utilizadas estratégias estatísticas qualitativas, avaliando as tendências da modelação dos valores simulados e observados ao longo do ciclo da cultura, como o coeficiente de regressão (b_0) linear forçada à origem (EISENHAUER, 2003) entre os valores obtidos pelo processamento de imagens satelitais e os dados simulados pelo modelo SIMDualKc, onde um valor próximo de 1,0 compele que os valores encontrados pelo NDVI estão estatisticamente próximos dos valores estimados pelo modelo SIMDualKc.

O coeficiente de determinação (R^2) da regressão por mínimos quadrados ordinários entre valores obtidos pelo NDVI com os valores simulados pelo modelo SIMDualKc. Quando o valor encontrado for próximo de 1,0 justifica que a maior parte da variância dos valores encontrados pelo NDVI é explicada pelos valores obtidos pelo modelo SIMDualKc.

A raiz quadrada do erro médio (RMSE) expressa a variância dos erros residuais. Quando o valor encontrado for igual a 0,0, um ajuste perfeito ocorreu.

A porcentagem de viés (PBIAS) identifica a tendência média dos dados simulados, que pode ser maior ou menor do que as observações correspondentes, compelindo uma sobre ou sub avaliação dos resultados encontrados.

O erro absoluto médio (AAE) expressa o tamanho médio dos erros estimados.

O erro relativo médio (ARE) expressa os erros de cálculo como uma porcentagem dos valores de observação.

A eficiência de modelagem (EF) que toma valores próximos de 1,0 indicando, que o desempenho do modelo é muito bom, desde então o erro quadrático médio é menor do que a variância das observações. Ao contrário, quando EF é zero ou negativa, onde induz que não há finalidade na utilização do modelo (MORIASI et al., 2007).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Parâmetros do balanço hídrico

O conhecimento das variáveis que compõe o balanço hídrico de um solo cultivado é de grande valia para que seja possível encontrar os parâmetros de interesse, como a evaporação, transpiração, percolação profunda, dentre outras propriedades que possam influenciar na maior ou menor faixa de demanda hídrica pela cultura. A seguir, são apresentados os componentes do balanço hídrico do solo obtidos com dados de campo, irrigações e precipitações pluviais, e estimados pelo modelo SIMDualKc para as três áreas irrigadas A, B e C (Tabela 03).

Tabela 03. Componentes do balanço hídrico do solo para a cultura do milho nos três anos agrícolas 2013/14, 2014/15 e 2016/17, referente às três áreas irrigadas A, B e C no município de Júlio de Castilhos – RS, Brasil.

Área	I (mm)	P (mm)	Δ ASW (mm)	DP (mm)	RO (mm)	Es (mm)	Tc (mm)	ETc (mm)	Es/ETc (%)
2013/14									
A	181,7	853	63,4	437,2	139,5	62,5	458,9	521,4	12
B	176,8	853	65,5	437,2	142,3	67,9	447,9	515,8	13
C	145,2	860	23,1	384,5	141,5	65,2	437,1	502,3	13
2014/15									
A	187,6	1116	-0,9	653,4	188,6	68,0	392,7	460,7	15
B	158,3	1110	6,4	651,6	171,9	67,7	383,5	451,2	15
C	164,1	1136	-38,6	608,6	186,1	66,5	400,3	466,8	14
2016/17									
A	153,6	788	-2,2	402,1	124,7	70,2	342,4	412,6	17
B	174,8	780	4,3	434,2	125,2	68,2	331,5	399,7	17
C	166,9	790	-39,3	390,9	130,1	65,2	331,4	396,6	16

Sendo: I = irrigação, P = precipitação, Δ ASW = variação da água disponível no solo, DP = percolação profunda, RO = escoamento superficial, Es = evaporação da água no solo, Tc = transpiração da cultura, ETc = evapotranspiração da cultura, Es/ETc = razão da evaporação pela evapotranspiração da cultura.

As irrigações aplicadas nas três áreas agrícolas variaram de 145,2 a 187,6 mm para os três anos avaliados. Estes baixos valores da irrigação somente foram possíveis devido às altas precipitações que ocorreram nos três ciclos culturais, que chegaram a 1.136 mm para a área irrigada C no ano agrícola de 2014/15.

Os componentes do balanço hídrico do solo evidenciam a importância de separar os parâmetros não utilizados pela cultura como a percolação profunda (DP) e o escoamento superficial (RO), que se relacionam com as altas precipitações. No ano agrícola de 2014/15 precipitaram 1.116 mm na área irrigada A, nesta área a DP chegou a 653,4 mm e o RO alcançou 188,6mm, que representam, 58,5% e 16,9% da precipitação sazonal. No caso da variável chuva, os componentes de água não benéficos para a cultura (DP e RO) alcançaram um valor de 75,4%, para a área irrigada A no ano agrícola 2014/15, desta forma uma grande fração da precipitação pluvial não foi utilizada pela cultura, sendo necessária a irrigação complementar para atender a demanda ETc do milho, que nessa área chegou a 187,6 mm.

Giménez et al. (2016) realizando estudos com milho no Uruguai identificaram uma DP entre 18% e 33% e um RO entre 20% e 28% de uma precipitação variando de 564 a 701 mm, onde a precipitação não utilizada pela cultura chegou a 44%. Esses dados demonstram a importância de separar os componentes do balanço hídrico do solo, para sim identificar quais parâmetros devem ter maior importância na gestão do uso da água para irrigação.

A relação Es/ETc representa a evaporação da estação da ETc, que obteve valores de 12 a 17% do uso da água neste estudo. Paredes et al. (2015^b) encontraram valores de 18 a 29% na relação Es/ETc realizando estudos com avaliação da produtividade da água na cultura do milho. Katerji et al. (2010), trabalhando com eficiência do uso da água para irrigação do milho, encontraram estimativas da relação Es/ETc de 16 a 33% para o ciclo da cultura. Estes valores demonstram que as perdas causadas pela evaporação da água no solo podem representar mais de 30% do uso da água nas áreas irrigadas, sendo de inteira importância a realização de práticas de manejo que possam reduzir a perda da água por evaporação do solo, como o uso de *mulching*.

Para a estimativa da ETc do milho pelo modelo SIMDualKc foram encontrados valores de 396,6 a 521,4 mm para os três ciclos culturais, os menores valores da ETc ocorreram no ano agrícola 2016/17 em que houveram menores ocorrências de precipitações. Fan et al. (2017) realizando pesquisas com eficiência no uso da água, na cultura do milho irrigado, encontraram valores de ETc de 509 a 570 mm. Zhang et al. (2017) trabalhando com híbridos de milho, em áreas áridas do noroeste da China, encontraram valores da ETc de 538,3 a 739 mm, valores próximos e acima dos resultados encontrados neste estudo. As diferenças encontradas nos valores da ETc do milho são explicadas pela dependência das condições pluviométricas,

temperatura, irrigações, manejo da cultura e do solo, uso de *mulching*, dentre outras variáveis ambientais que condicionam a demanda evapotranspirativa em lavouras irrigadas.

3.2 Parâmetros da cultura e do solo

Na Tabela 04, são apresentados os parâmetros calibrados de Giménez et al. (2016) e os valores médios do Kcb obtidos pelo NDVI nos três ciclos culturais analisados.

Tabela 04. Parâmetros da cultura e do solo calibrados e obtidos pelo processamento de imagens orbitais, na obtenção dos valores Kcb NDVI.

	Parâmetro	Calibrado	NDVI
Cultura	Kcb ini	0,15	0,15
	Kcb med	1,05	1,07
	Kcb final	0,30	0,63
	<i>p</i> ini	0,55	-
	<i>p</i> des	0,55	-
	<i>p</i> med	0,50	-
	<i>p</i> end	0,75	-
Evaporação	REW (mm)	10	-
	TEW (mm)	23	-
	Ze (m)	0,10	-
Percolação	aD	360	-
	bD	-0,017	-
Escoamento	CN	80	-

K_{cb}: Coeficiente de cultura basal; *p*: fração de depleção sem estresse; REW: água facilmente evaporável; TEW: água evaporável total; Ze: Camada evaporável do solo; aD e bD são parâmetros da equação de percolação proposta por Liu et al. (2006); CN: curva número; parâmetros Calibrados (GIMÉNEZ et al., 2016), NDVI valores médios de Kcb obtidos pelo processamento das imagens orbitais.

A comparação dos valores obtidos por Giménez et al. (2016) com os valores encontrados pelo NDVI é relevante para identificar as variações que ocorreram em metodologias distintas e que caracterizam a situação local do estudo identificado pelo NDVI, nos três estádios fenológicos da cultura do milho.

Os valores resultantes para obtenção do Kcb NDVI nos três estádios da cultura foram os valores médios encontrados pelas três áreas A, B e C nos três ciclos culturais, sendo Kcb NDVI (ini) = 0,15, Kcb NDVI (med) = 1,07 e Kcb NDVI (final) = 0,63.

A seguir são apresentados, na tabela 05, os valores de Kcb estimados pelo modelo SIMDualKc e pelo processamento das imagens satelitais na obtenção dos valores de Kcb NDVI, para as três áreas irrigadas nos três estádios da cultura (inicial, intermediário e final). Os valores de Kcb final, para o modelo SIMDualKc e para os dados de NDVI, representam a última data observada pelo Sensor OLI, para os três anos agrícolas sendo: 19/01/14, 22/01/15 e 11/01/17.

Tabela 05. Valores de Kcb estimados pelo modelo SIMDualKc e pelo processamento de imagens satelitais na obtenção dos valores de Kcb NDVI, para cada estágio fenológico, nas três áreas irrigadas.

Parâmetros	Áreas irrigadas									Média
	Ano agrícola 2013/14			Ano agrícola 2014/15			Ano agrícola 2016/17			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Kcb (ini)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Kcb (med)	1,01	1,02	1,02	1,01	1,01	1,01	1,00	1,01	1,00	1,01
Kcb (final)	0,87	0,78	0,79	0,37	0,30	0,30	0,58	0,50	0,53	0,56
Kcb NDVI (ini)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Kcb NDVI (med)	1,04	1,00	1,04	1,09	1,08	1,12	1,08	1,08	1,08	1,07
Kcb NDVI (final)	0,89	0,90	0,91	0,37	0,49	0,45	0,50	0,49	0,68	0,63

Sendo: Kcb obtidos pelo modelo SIMDualKc e Kcb NDVI obtidos pelo processamento das imagens satelitais para as três áreas irrigadas em cada estágio vegetativo sendo: (ini) - inicial, (med) - intermediário e (final) - final.

Os valores de Kcb (ini), estimados a partir do modelo SIMDualKc e pelo processamento das imagens orbitais, obtiveram o valor de 0,15 devido a cultura estar em estágio inicial com uma *fc* de até 10%, não havendo ainda uma expansão da área foliar representativa da cultura, sendo que os parâmetros de entrada são valores calibrados para o modelo e para o cálculo da estimativa do Kcb NDVI. No entanto, nos resultados encontrados para o Kcb (med) os valores do Kcb NDVI foram diferenciados do modelo SIMDualKc devido o comportamento da resposta espectral identificada nos valores do NDVI, resultando em valores do Kcb NDVI (med) de 1,00 a 1,12, estes superiores aos Kcb (med) obtidos pelo modelo SIMDualKc que alcançaram valores de 1,00 a 1,02.

Os valores de Kcb (med) estimados pelo modelo SIMDualKc nas três áreas irrigadas foi igual a 1,01, valor abaixo ao encontrado por Miao et al. (2016) que realizaram estudos com modelo de balanço hídrico em Hetao – Mongólia e obtiveram os valores de Kcb (med) = 1,15 para a cultura do milho, onde havia contribuição dos lençóis freáticos para atender a demanda ETc do milho. Shahrokhnia e Sepaskhah (2013) realizando pesquisas para estimar a ETc do milho, em uma região semiárida no sudoeste do Irã, encontraram valores de Kcb (med) = 1,07 para o milho. Rosa et al. (2016) encontraram um valor de Kcb (med) = 1,15 para aproximação Kc dual em Portugal, em estudo considerando o estresse salino transitório sobre as taxas de transpiração do milho. Os valores encontrados na literatura ficaram próximos dos encontrados neste estudo para estimativa do Kcb pelo modelo SIMDualKc, em condições de clima subtropical úmido, onde não havia contribuição da água do lençol freático para atender a demanda ETc do milho.

Campos et al. (2017) realizando pesquisas para obter dados de Kcb a partir do IV com imagens dos sensores TM e ETM⁺, da plataforma Landsat, para híbridos de milho em Nebraska,

obtiveram valores de K_{cb} (med) = 0,95. Battude et al. (2017) realizando estudo para estimar a demanda hídrica total para a cultura do milho no sudoeste da França, utilizando imagens de satélite de alta resolução espacial, encontraram valores de K_{cb} (med) = 0,65 - 0,90. Valores estes inferiores aos encontrados neste estudo para estimativa do K_{cb} a partir do IV, de modo que os dados de IV identificam as condições reais das áreas agrícolas. Desta maneira, o manejo da irrigação pode se adequar as condições locais identificadas pelo IV, que proporciona em muitas situações a redução no uso da água para irrigação, comparado com dados padrão da demanda transpirativa para a cultura do milho (Allen et al., 1998).

A seguir, são apresentados os resultados dos indicadores estatísticos encontrados para a relação dos valores do K_{cb} obtidos pelo NDVI com os valores de K_{cb} estimados pelo modelo SIMDualKc (Tabela 06).

Tabela 06. Indicadores de ajustamento aos dados encontrados pelo processamento de imagens satelitais na obtenção de valores de K_{cb} NDVI, com os resultados do K_{cb} estimados pelo modelo SIMDualKc para a cultura do milho, realizados nas três áreas irrigadas A, B e C, nos três anos analisados.

Área	b_0	R^2	RMSE	PBIAS	AAE	ARE	EF
A	0,95	0,98	0,05	4,0	0,04	6,77	0,98
B	0,97	0,95	0,08	1,9	0,05	9,03	0,95
C	0,91	0,97	0,08	9,2	0,05	9,87	0,95

Sendo: b_0 – coeficiente de regressão; R^2 - coeficiente de determinação; RMSE – raiz quadrada do erro médio; PBIAS – percentual de viés; AAE – erro médio absoluto; ARE - erro médio relativo; EF – eficiência de modelagem.

Os resultados alcançados pelo coeficiente de regressão foram $\geq 0,91$, indicando que os valores encontrados pelo K_{cb} NDVI são estatisticamente próximos aos valores estimados pelo K_{cb} SIMDualKc. Os valores encontrados para o coeficiente de determinação foram $\geq 0,95$ para os três anos agrícolas, induzindo que a maior parte da variância dos valores obtidos pelo K_{cb} NDVI é próximo da variância dos valores estimados com o modelo SIMDualKc. Os resultados obtidos neste trabalho estão dentro dos valores encontrados em Pôças et al. (2015) que compararam valores do K_{cb} SIMDualKc com K_{cb} IV derivados do NDVI para a cultura do milho.

O RMSE obteve valores $\leq 0,08$, demonstrando a possível ocorrência de pequenos erros de estimativa para a relação do K_{cb} NDVI com o K_{cb} SIMDualKc. Campos et al. (2017), realizando estudos com estimativas da evapotranspiração da cultura do milho baseadas em IV, encontraram valores de RMSE de 0,048 indicando uma boa concordância nos dados de K_{cb} medidos com os valores de K_{cb} modelados. Os valores encontrados para a PBIAS indica uma pequena sobre estimacão nos dados encontrados pelo NDVI com baixos valores positivos $\leq 9,2$.

O AAE obteve valores $\leq 0,05$ identificando que houveram pequenos erros na estimativa da aproximação do Kcb NDVI com o Kcb SIMDualKc. Para o ARE foi encontrado uma porcentagem $\leq 9,87$ indicando uma proximidade nos resultados de ambas metodologias com pequenos erros. Os valores da EF ficaram $\geq 0,95$ para este estudo, onde delinea que a variância dos resíduos encontrados pelos valores do Kcb NDVI é menor do que a variância dos resíduos estimados pelos valores do Kcb SIMDualKc.

A seguir, são apresentadas as variações diárias dos parâmetros de irrigação simulados pelo modelo SIMDualKc, onde foi definida uma área para cada ano agrícola ilustrando o comportamento espaço temporal dos parâmetros de irrigação em cada estágio fenológico da cultura do milho (Figura 02).

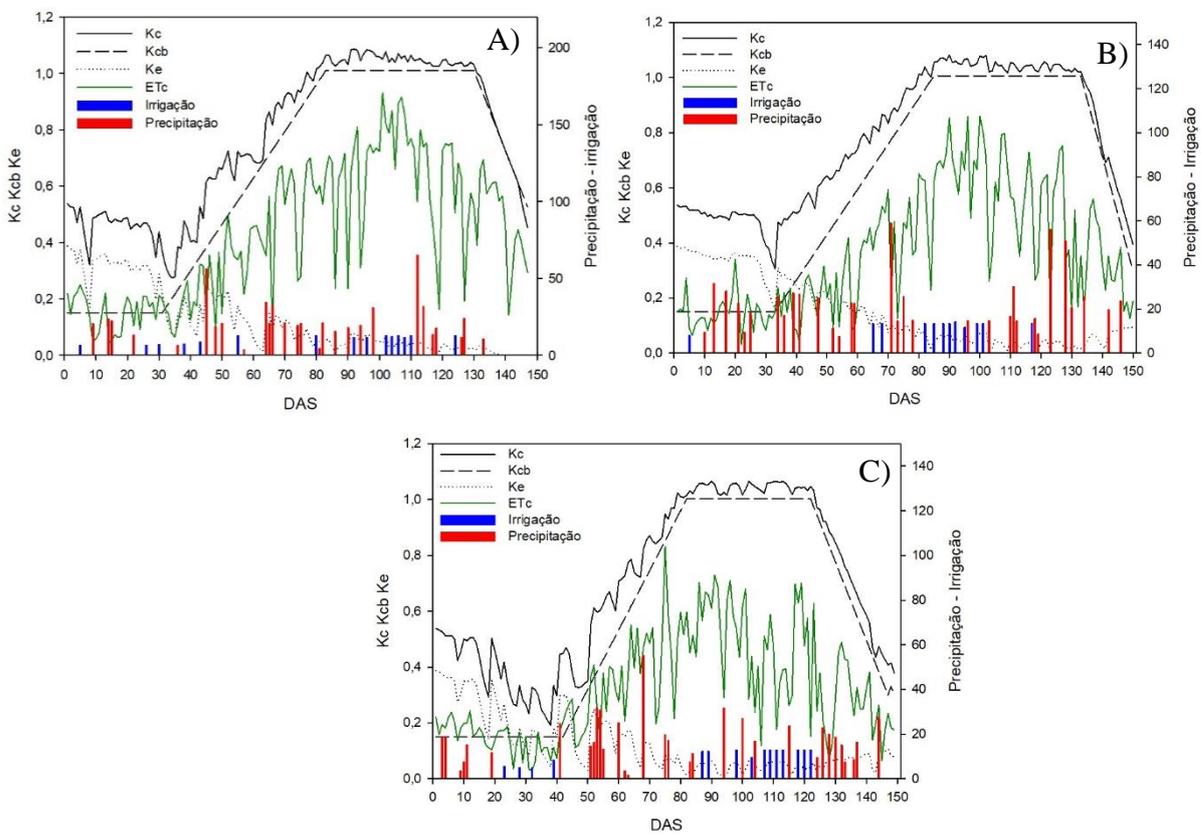


Figura 02. Variação sazonal dos parâmetros de irrigação diários para a área irrigada A no ano agrícola 2013/14; área irrigada B no ano agrícola 2014/15; e área irrigada C para o ano agrícola 2016/17. Sendo: Kc – coeficiente de cultura, Kcb – coeficiente de cultura basal, Ke – coeficiente de evaporação da água no solo, ETc – evapotranspiração da cultura. Também são apresentadas as precipitações e as irrigações que ocorreram no ciclo.

O comportamento dos parâmetros da irrigação, ilustrados na Figura 02, para as três áreas agrícolas não identificaram estresse hídrico nos três anos agrícolas propostos 2013/14, 2014/15

e 2016/17, devido a demanda evapotranspirativa da cultura ser atendida pelas precipitações e irrigações complementares.

Os valores do Kc estimados pelo modelo SIMDualKc para a área irrigada A no ano agrícola de 2013/14 foram Kc ini = 0,53, Kc med = 1,06 e Kc final = 0,45. Wang et al. (2017) realizando estudos para estimar a evapotranspiração real do milho, em uma região semiúmida e propensa à seca na China, encontraram valores de Kc ini = 0,49, Kc med = 0,96 e Kc final = 0,77 para o ano de 2013. Observa-se que os valores dos coeficientes de cultivo, para os três estádios da cultura, podem ser diferenciados de acordo com as condições climáticas locais, métodos de pesquisa, sistemas e manejo de irrigação, dentre outros fatores envolvidos nos sistemas produtivos irrigados que caracterizam a demanda hídrica da cultura local.

Na Figura 03 é apresentada a análise de dispersão dos resultados obtidos pelo Kcb encontrado pelo NDVI com o Kcb estimado pelo modelo SIMDualKc, para as três áreas irrigadas A, B e C, nos três anos agrícolas estudados 2013/14, 2014/15 e 2016/17.

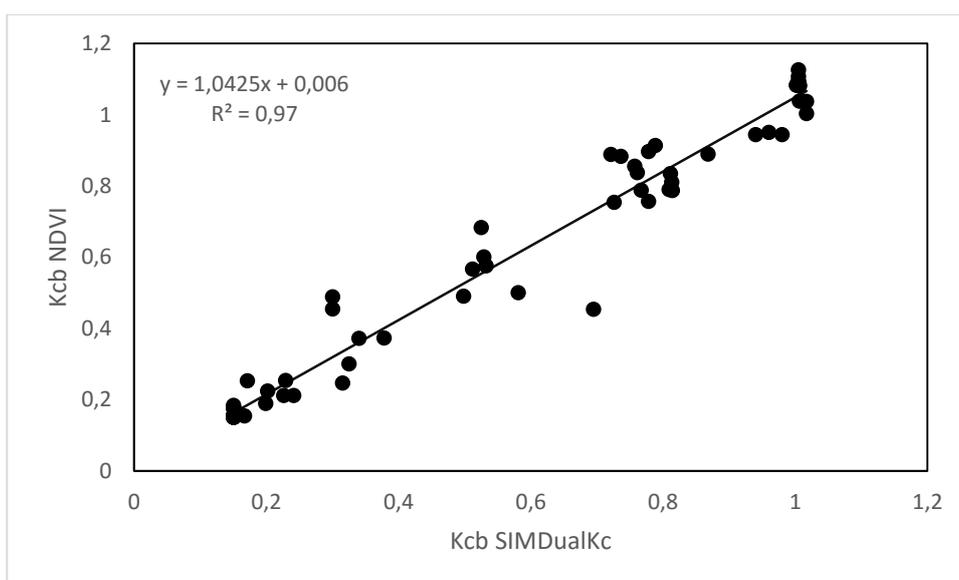


Figura 03. Análise de dispersão dos resultados do Kcb obtido pelo NDVI com o Kcb estimado pelo modelo SIMDualKc, para as áreas irrigadas A, B e C nos três anos agrícolas 2013/14, 2014/15 e 2016/17.

Os resultados obtidos pelo NDVI, na estimativa ao Kcb, são correlacionados com os valores de Kcb estimados pelo modelo SIMDualKc para as três áreas irrigadas nos anos agrícolas de 2013/14, 2014/15 e 2016/17, o qual obteve um coeficiente de determinação de 0,97. Este resultado se justifica pelo fato dos valores determinados pelo Kcb NDVI serem parâmetros capazes de estimar a transpiração da cultura em dado estágio de desenvolvimento,

pois incorpora dados da fração de cobertura da planta e altura da planta. Os valores de NDVI também podem identificar a ocorrência de estresse hídrico, pois relacionam-se com parâmetros fisiológicos da cultura, incluindo o IAF, atividade fotossintética (JOHNSON e TROUT, 2012).

Pôças et al. (2015) realizando estudos com milho encontraram um coeficiente de determinação de 0,74 para a relação Kcb SIMDualKc com o Kcb IV, onde foram obtidas 12 imagens satelitais. No estudo proposto foi possível obter 23 imagens para cobrir os três ciclos culturais, desta maneira, o número de informações obtidas pelo NDVI para a cultura é mais representativo, uma vez que o município de Júlio de Castilhos – RS, Brasil encontra-se em uma área de sobreposição de imagens para o Sensor OLI, reduzindo assim a resolução temporal que é de 16 dias, para aproximadamente 8 dias.

Toureiro et al. (2017) realizando estudos para estimar a demanda hídrica da cultura do milho, com intuito de adequar o uso da água com os requisitos reais da cultura, utilizando dados de sensoriamento remoto, encontraram um $R^2 = 0,85$ para relação do Kcb com dados do NDVI, em Évora, Portugal em uma área de 500 ha irrigados com sistemas do tipo pivô central. O resultado de 0,85, para o R^2 , encontrado por Toureiro et al. (2017) e o valor de 0,97 para este estudo, prediz que maior parte da variância dos valores encontrados pelo NDVI é explicada pelos valores obtidos pelo Kcb nas avaliações realizadas em Évora como em Júlio de Castilhos, RS.

Os resultados globais encontrados pela avaliação estatística confirmou um bom ajuste entre os valores do Kcb NDVI com os valores do Kcb SIMDualKc ao longo dos três ciclos culturais, nas três áreas avaliadas. Demonstrando que os dados obtidos pelo modelo SIMDualKc, que utiliza dados do solo, da planta e do clima local, somado aos resultados encontrados pelo processamento de imagens satelitais vêm contribuir para a gestão da irrigação em lavouras de milho. Onde foi utilizado dados do NDVI, por fornecer dados reais da cultura a campo em nível de pixel, na forma proposta, o que é plausível no caso das áreas irrigadas por pivô central, pois possuem características que favorecem a aplicação de métodos para a estimativa do Kcb NDVI, onde o crescimento uniforme das plantas dentro de uma área bem definida beneficiam o ajuste e a calibração dos valores obtidos pelos índices de vegetação em cada estágio de desenvolvimento da cultura, com dados de campo.

Neste sentido os dados obtidos pelo NDVI tornam-se instrumentos promissores para auxiliar a melhorar a eficiência no manejo da água na irrigação, pelo comportamento espectral identificado pela refletância das áreas agrícolas em dado estágio de desenvolvimento, possibilitando encontrar os coeficiente de cultivos para calcular a lâmina de irrigação.

4 CONCLUSÕES

Os resultados encontrados pelo processamento das imagens satelitais confrontados com os valores estimados pelo modelo SIMDualKc, mostraram um bom desempenho na aproximação ao Kcb, onde obtiveram valores para b_0 de 0,91 a 0,97 nas três áreas irrigadas, indicando que os valores encontrados pelo Kcb NDVI são estatisticamente próximos aos valores estimados pelo Kcb SIMDualKc nos três anos analisados.

A partir do modelo SIMDualKc foi possível alcançar os parâmetros do balanço hídrico do solo que são base para determinar a demanda hídrica da cultura em sistemas produtivos com altas frequências de irrigação, e identificar as variáveis de maior importância para aperfeiçoar o manejo da água em sistemas irrigados.

Os Kcb estimados pelo modelo SIMDualKc, para os três estádios da cultura do milho na região do estudo, são parâmetros que podem ser utilizados para calcular a demanda hídrica da cultura em outras regiões no sul do Brasil, a exceção onde as condições ambientais sejam muito distintas.

Os valores estimados pelo processamento de imagens satelitais, na obtenção dos Kcb NDVI, forneceram informações para determinar a demanda transpirativa da cultura do milho nos três estádios principais da cultura (inicial, intermediário e final). Neste contexto, onde se utilizam imagens satelitais para estimativa da demanda hídrica da cultura do milho, os dados de Kcb NDVI poderão servir para melhor adequar o uso da água em sistemas agrícolas, em regiões do Sul do Brasil, os quais necessitam também de acompanhamento a campo da cultura para obter subsídios para aferição dos valores estimados pelo NDVI e melhorar a eficiência do uso da água em sistemas produtivos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements; FAO Irrigation and **Drainage Paper 56**; FAO: Rome, Italy, (1998), 300 p.
2. ALLEN, R.G; Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. **Journal of Hydrology** 229 (2000), p. 27–41.
3. ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; SMITH, M.; RAES, D.; WRIGHT, J.L. The FAO-56 dual crop coefficient method for predicting evaporation from soil and application extensions. **J. Irrig. Drain. Eng.** 131, (2005), p. 2–13.

4. ALLEN, R.G., CLEMMENS, A.J., BURT, C.M., SOLOMON, K., O'HALLORAN, T. Prediction accuracy for project wide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 131 (2005), p. 24–36.
5. ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrig. Sci.*, 28 (2009), p. 17–34.
6. BATTUDE, M., BITAR, A., BRUT, A., TALLEC, T., HUC, M., CROS, J., WEBER, J. J., LHUISSIER, L., SIMONNEAUX, V., DEMAREZ, V. Modeling water needs and total irrigation depths of maize crop in the south west of France using high spatial and temporal resolution satellite imagery. *Agricultural Water Management* 189 (2017) 123–136.
7. BÖHNER, J., MCCLOY, K.R., STROBL, J. [EDS.]: SAGA – Analysis and Modelling Applications. *Göttinger Geographische Abhandlungen*, Vol.115, (2006), 130p.
8. CALERA, A.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; MELIA, J. Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *Int. J. Remote Sens.* (2004), 25, p. 97–109.
9. CALERA, A.; CAMPOS, I.; OSANN, A.; D'URSO, G.; MENENTE M. Remote Sensing for Crop Water Management: From ET Modeling to Services for the End Users. *Sensors* (2017), 17, 1104; doi:10.3390/s17051104.
10. CAMPOS I., BOTETA L., BALBONTÍN C., FABIÃO M., MAIA J., CALERA A. Remote sensing based water balance to estimate evapotranspiration and irrigation water requirements. Case study: Grape vineyards. *Options Mediterranean's*, B, 67, (2012).
11. CAMPOS, I.; NEALE, C. M. U.; SUYKER, A. E.; ARKEBAUER, T. J.; GOLÇALVES, I. Z.; Reflectance-based crop coefficients REDUX: For operational evapotranspiration estimates in the age of high producing hybrid varieties. *Agricultural Water Management*, Volume 187, June (2017), p. 140-153.
12. CHAVEZ, P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment* April (1988), 24(3), p. 459-479.
13. DING, R.; KANG, S.; ZHANG, Y.; HAO, X.; TONG, L.; DU, T. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching. *Agric. Water Manag.* 127, (2013), p. 85–96.
14. EISENHAUER, J.G. Regression through the origin. *Teaching Statistics* 25(3), (2003), p. 76-80.
15. FAN, Y.; DING, R.; KANG, S., HAO, X.; DU, T.; TONG, L.; LI, S. Plastic mulch decreases available energy and evapotranspiration and improves yield and water use efficiency in an irrigated maize cropland. *Agricultural Water Management* 179 (2017), p. 122–131.
16. GIMÉNEZ, L., PETILLO, M. G., PAREDES, P., AND PEREIRA, L. S. Predicting Maize Transpiration, Water Use and Productivity for Developing Improved Supplemental

- Irrigation Schedules in Western Uruguay to Cope with Climate Variability. **Water** (2016), 8, 309; doi:10.3390/w8070309.
17. 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, p. 4050–4062.
 18. KATERJI, N., MASTRORILLI, M., CHERNI, H. E. Effects of corn deficit irrigation and soil properties on water use efficiency. A 25-year analysis of a Mediterranean environment using the STICS model. **Eur. J. Agron.** (2010) 32, p. 177-185.
 19. JOHNSON, L. F.; TROUT, T. J. Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin valley. **Remote Sensing**, (2012) 4, p. 439-455.
 20. KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. *Disciplinarium Scientia*, Santa Maria, V. 2, nr. 1, (2001) p. 171-182.
 21. LI, J.; FENG, L.; PANG, X.; GONG, W.; ZHAO, X. Radiometric cross Calibration of Gaofen-1 WFV Cameras Using Landsat-8 OLI Images: A Simple Image-Based Method. **Remote Sens.** (2016), 8, 411.
 22. LIU, Y.; PEREIRA, L.S.; FERNANDO, R.M. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: Parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. **Agric. Water Manag.** (2006), 84, p. 27–40.
 23. MADUGUNDU, R.; AL-GAADI, K.; TOLA, E.; KAYAD, A. G.; JHA, C. S. Estimation of gross primary production of irrigated maize using Landsat-8 imagery and Eddy Covariance data. **Saudi Journal of Biological Sciences** (2017) 24, p. 410–420.
 24. MIAO, Q., ROSA, R. D., SHI, H., PAREDES, P., ZHUA, L., DAI, J., GONCALVES, J. M., PEREIRA, L. S. Modeling water use, transpiration and soil evaporation of spring wheat–maize and spring wheat–sunflower relay intercropping using the dual crop coefficient approach. **Agricultural Water Management**, Volume 165, February (2016), Pages 211-229.
 25. MICHELON, C. J., CARLESSO, R., OLIVEIRA, Z. B., KNIES, A. E., PETRY, M. T., & MARTINS, J. D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, 40, (2010), p. 848 - 853.
 26. MONTEITH, J.; UNSWORTH, M. **Principles of Environmental Physics, 2nd. Edition.** (1990), Edward Arnold, London.
 27. MORIASI, D. N., ARNOLD J. G., VAN LIEW, M. W., BINGNER, R. L., HARMEL, R. D., VEITH, T. L. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers** ISSN 0001–2351, (2007).

28. PAREDES, P., RODRIGUES, G. C., ALVES, I., CAMEIRA, M. R., ABREU, J. P. M., TORRES, M. O., PEREIRA, L. S. Calendários de rega para condições de seca e sua avaliação pela produtividade da água. Aplicação a cevada e milho, (2015^a): <https://www.researchgate.net/publication/287968171>.
29. PAREDES, P., PAÇO T.A., ROSA R.G., PÔÇAS I., NEVES M., PEREIRA, L.S., (2015^b). Avaliação do uso da água em regadio: aplicação do modelo SIMDualKc a cevada, milho e olival. <https://www.researchgate.net/publication/287967893>.
30. PEREIRA, L.S.; PAREDES, P.; RODRIGUES, G.C.; NEVES, M. Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc models. *Agric. Water Manag.* **V.** 159, (2015), p. 239–254.
31. PIERUSCHKA, R., HUBER, G., BERRY, J.A. Control of transpiration by radiation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107 (30) (2010), p. 13372–13377.
32. PÔÇAS, I., RODRIGUES, A., GONÇALVES, S., COSTA, P. M., GONÇALVES, I., PEREIRA, L. S. AND CUNHA, M. Predicting Grapevine Water Status Based on Hyperspectral Reflectance Vegetation Indices. *Remote Sens.* (2015), 7, p. 16460–16479; doi:10.3390/rs71215835.
33. RAES, D., STEDUTO, P., HSIAO, T.C., AND FERERES, E. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, (2009), 101(3), p. 438-447.
34. RICHARDS, L.A. Methods of measuring moisture tension. *Soil science*, v.58, (1949) p.95-112.
35. ROSA, R. D., PAREDES. P., RODRIGUES. G. C., FERNANDO, R. M., ALVES, I., PEREIRA, L. S., ALLEN, R. G. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software: 1. Background and computational strategy. *Agricultural Water Management*, 103 (2012), p. 8–24.
36. ROSA, R.D., RAMOS, T.B. B., PEREIRA, L.S. The dual Kc approach to assess maize and sweet sorghum transpiration and soil evaporation under saline conditions: Application of the SIMDualKc model. *Agricultural Water Management* 177 (2016), p. 77–94.
37. RITCHIE, S. W., HANWAY, J. J., BENSON, G. O. How a corn plant develops. *Special Bulletin*, Iowa, n. 48. (1993).
38. ROUSE, J. W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A., DEERING, D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*. Greenbelt: NASA. (1974).
39. SHAHROKHANIA, M.H., SEPASKHAH, A.R. Single and dual crop coefficients and crop evapotranspiration for wheat and maize in a semi-arid region. *Theor. Appl. Climatol.* (2013), 114, p. 495–510.

40. SICZEKA, A., HORNB, R., LIPIECA, J., USOWICZA, B., Lukowski, M. Effects of soil deformation and surface mulching on soil physical properties and soybean response ated to weather conditions. **Soil & Tillage Research** 153 (2015), p. 175–184.
41. STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D. et al. Solos do Rio Grande do Sul. 2.ed. Porto Alegre: **EMATER/RS**, UFRGS, (2008). 222p
42. TOUMI, J. · ER-RAKI, S., EZZAHAR, J., KHABBA, S., JARLAN, L., CHEHBOUNI, A. Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. **Agricultural Water Management** 163· JANUARY (2016), p. 219-235.
43. TOUREIRO, C.; SERRALHEIRO, R.; SHAHIDIAN, S.; SOUSA, A. Irrigation management with remote sensing: Evaluating irrigation requirement for maize under Mediterranean climate condition. **Agricultural Water Management** 184 (2017), p. 211–220. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.02.010>.
44. USDA, National Agricultural Statistics Service Cropland Data Layer (2013). Published crop-specific data layer [Online]. Washington, DC: USDA-NASS (Available at <http://nassgeodata.gmu.edu/CropScape>)
45. WANG, J., WANG, J.L., ZHAO, C.X., MCGIFFEN, M.E., LIU, J.B., WANG, G.D. Assessing the performance of two models on calculating maize actual evapotranspiration in a semi-humid and drought-prone region of China. (2017), DOI 10.1007/s00704-016-2032-2.
46. ZHAO, W., LIU, B., ZHANG, Z. Water requirements of maize in the middle Heihe River basin, China. **Agricultural Water Management**, 97 (2) (2010), p. 215–223.
47. ZHANG, G.; LIUA, C.; XIAO, C.; XIE, R.; MING, B.; HOU, P.; LIU, G.; XUA, W.; SHENA, D.; WANG, K.; LI, S. Optimizing water use efficiency and economic return of super high yield spring maize under drip irrigation and plastic mulching in arid areas of China. **Field Crops Research** 211 (2017), p. 137–146.

ARTIGO II - EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DO MILHO IRRIGADO POR PIVÔ CENTRAL DERIVADO DO NDVI E APROXIMAÇÃO K_c DUAL NO SUL DO BRASIL

RESUMO: A estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_c) é de fundamental importância para o manejo da água na irrigação e adequação ao uso racional dos recursos hídricos em sistemas agrícolas. Nesse sentido a técnica do sensoriamento remoto, obtida por imagens de satélite, torna-se uma ferramenta promissora para estimar a demanda ET_c , pois pode imagear grandes áreas e definir valores médios representativos dos coeficientes de cultivo, a partir de metodologias que usam o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI). Desta maneira, objetiva-se neste estudo estimar a ET_c do milho por meio dos coeficientes de cultivo, obtidos pelo processamento das imagens do Sensor OLI, plataforma Landsat 8, e pelo modelo de balanço hídrico do solo SIMDual K_c , o qual utiliza a abordagem do coeficiente de cultura (K_c) dual para tal determinação ($K_c = K_{cb} + K_e$), onde o K_{cb} é o coeficiente de cultura basal, e o K_e representa o coeficiente de evaporação da água no solo. Também foram avaliados os cenários da irrigação utilizando os indicadores de produtividade da água, como a produtividade total da água (WP) e a produtividade da água da irrigação (WPirrig). Essas avaliações foram realizadas em três áreas irrigadas por pivô central, nos anos agrícolas 2013/14, 2014/15 e 2016/17, no município de Júlio de Castilhos – RS. Para essa finalidade utilizaram-se 23 imagens do Sensor OLI nas órbitas 222/80 e 223/80, banda 4 (banda do vermelho visível) e banda 5 (banda do infravermelho próximo), para formar as imagens NDVI em cada área. Os valores médios encontrados pelo NDVI, em cada área irrigada, foram utilizados para calcular o K_{cb} e o K_c na estimativa da ET_c nos três estádios fenológicos (inicial, intermediário e final) da cultura do milho. Para estimar a ET_c através do modelo SIMDual K_c foram necessários dados referentes a fenologia da cultura, características físicas e hidráulicas do solo e variáveis meteorológicas locais. Os resultados estatísticos mostraram um coeficiente de determinação (R^2) de 0,97 para a relação da ET_c derivada pelo NDVI com a ET_c estimada pelo modelo SIMDual K_c , nas três áreas irrigadas, para os três anos analisados. O valor de 0,97, para o R^2 , evidencia que a maior parte da variância dos valores estimados pelo processamento das imagens orbitais é explicada pelos valores encontrados a partir do modelo SIMDual K_c . Considerando os resultados obtidos, a estimativa da ET_c por meio do NDVI mostra-se uma ferramenta útil para determinar a necessidade hídrica da cultura do milho irrigado por pivô central no Sul do Brasil, visando complementar o gerenciamento do uso da água na irrigação, que demanda de avaliações periódicas a campo para definir a lâmina de irrigação em cada estágio fenológico.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, coeficiente de cultura, SIMDual K_c , Sensor OLI, demanda hídrica cultural.

ARTICLE II - EVAPOTRANSPIRATION OF CULTURE OF CORN IRRIGATED BY CENTRAL PIVOT DERIVED FROM NDVI AND APPROXIMATION K_c DUAL IN THE SOUTH OF BRAZIL

ABSTRACT: Estimating crop evapotranspiration (ET_c) is of fundamental importance for water management in irrigation and adaptation to the rational use of water resources in agricultural systems. In this sense, the remote sensing technique, obtained by satellite images, becomes a promising tool to estimate ET_c demand, since it can image large areas and define average values representative of crop coefficients, using methodologies that use the normalized difference vegetation index (NDVI). In this way, the objective of this study is to estimate the ET_c of the maize by means of the cultivation coefficients, obtained by the Sensor OLI image processing, Landsat 8 platform, and by the soil water balance model SIMDual K_c , which uses the coefficient approach dual ($K_c = K_{cb} + K_e$), where K_{cb} is the basal culture coefficient, and K_e represents the coefficient of evaporation of water in the soil. The irrigation scenarios were also evaluated using water productivity indicators, such as total water productivity (WP) and irrigation water productivity (WP_{irrig}). These evaluations were carried out in three central pivot irrigated areas, in the agricultural years 2013/14, 2014/15 and 2016/17, in the municipality of Júlio de Castilhos - RS. For this purpose 23 images of the Sensor OLI were used in orbits 222/80 and 223/80, band 4 (visible red band) and band 5 (near infrared band) to form the NDVI images in each area. The mean values found by NDVI in each irrigated area were used to calculate K_{cb} and K_c in the estimation of ET_c in the three phenological stages (initial, intermediate and final) of the maize crop. To estimate ET_c through the SIMDual K_c model data were required regarding crop phenology, soil physical and hydraulic characteristics and local meteorological variables. The statistical results showed a coefficient of determination (R^2) of 0,97 for the relation of ET_c derived by the NDVI with ET_c estimated by the SIMDual K_c model, in the three irrigated areas, for the three years analyzed. The value of 0,97 for R^2 shows that most of the variance of the values estimated by the processing of the orbital images is explained by the values found from the SIMDual K_c model. Considering the results obtained, ET_c estimation using the NDVI is a useful tool to determine the water requirement of the central pivot irrigated maize crop in the South of Brazil, aiming at complementing the management of water use in irrigation, which demands of periodic field assessments to define the irrigation depth at each phenological stage.

Keywords: Remote sensing, crop coefficient, SIMDual K_c , Sensor OLI, cultural water demand.

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é o cereal de maior expressão econômica mundial, pois apresenta a maior área cultivada no mundo, devido à sua produtividade e larga escala de utilização (SEAB, 2012). Na safra 2016/17, foi semeada uma área de aproximadamente 17,6 milhões de hectares do cereal no Brasil, com uma estimativa de produção de 97.712 mil toneladas (CONAB, 2017). No Estado do Rio Grande do Sul a área cultivada com milho, no ano agrícola 2017/18, foi de aproximadamente 828 mil hectares. Neste mesmo ano, a produtividade média obtida nas lavouras foi de 6,5 ton/ha e, considerando apenas as áreas irrigadas por pivô central, esses números ultrapassaram a 12 ton/ha (CONAB, 2018). Isso demonstra a importância da prática da irrigação na manutenção da produtividade nas culturas agrícolas, os quais dependem também da disponibilidade hídrica e gestão eficaz do seu uso.

O uso eficiente da água para obter maiores produtividades em sistemas agrícolas irrigados é um desafio constante para agrônomos, empresas de irrigação e para o próprio agricultor, pois as medições e as variáveis associadas ao ambiente solo-planta-atmosfera são inúmeras e em muitas ocasiões de difícil mensuração, seja a campo ou laboratório. Desta forma, torna-se necessário aplicar metodologias que proporcionem um adequado manejo no uso da água em sistemas agrícolas, com vistas ao uso racional dos recursos hídricos que estimem a evapotranspiração da cultura (ET_c) mais próxima a realidade local.

A parametrização mais aceita para o procedimento de cálculos na estimativa da ET_c se encontra descrita no boletim 56 da FAO (ALLEN et al., 1998), onde sua publicação deu origem a uma série de modelos matemáticos que auxiliam no planejamento da irrigação, normalmente estes se utilizam do cálculo da ET_c e da simulação do balanço hídrico do solo para definir a lâmina de irrigação. O SIMDualK_c é um exemplo de modelo, baseado na simulação do balanço hídrico do solo que estima a ET_c utilizando a multiplicação do coeficiente de cultura (K_c) com a evapotranspiração da cultura de referência (ET_o), que vai de encontro a aplicação da FAO-56 (ROSA et al., 2012). O modelo SIMDualK_c adota a abordagem do K_c dual, o que permite maior precisão na estimativa da ET_c, devido à separação do K_c no coeficiente de cultura basal (K_{cb}), representando a transpiração da cultura, e no coeficiente de evaporação da água do solo (K_e), sobretudo na identificação dos impactos da frequência da irrigação e do uso total da água no sistema de cultivo (ALLEN et al., 2005^a).

Para avaliar os cenários do uso da água em sistemas agrícolas irrigados podem ser utilizados os indicadores de produtividade da água, como a produtividade total da água (WP), calculada pela relação da produtividade média das culturas com o volume total de água utilizada

por elas, e a produtividade da água da irrigação (WP_{irrig}), que relaciona a produtividade das culturas com a água advinda apenas da irrigação (RODRIGUES & PEREIRA, 2009; PEREIRA et al., 2012).

Os dados de sensoriamento remoto também têm sido utilizados para a aplicação da estimativa do K_{cb} e do K_c nas áreas agrícolas, para diferentes datas de plantio, espaçamento entre plantas, diferenças entre cultivares e outros fatores no manejo do solo e da cultura, a partir da variação espacial do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), que possibilita a estimativa da ET_c na aplicação do manejo da água em ambientes agrícolas irrigados (PEREIRA et al., 2015). Estas informações podem ser integradas em um sistema de informação geográfica (SIG) e em modelos matemáticos, com intuito de obter a estimativa dos coeficientes de cultivo para determinar a ET_c no tempo e no espaço ocupado pelas áreas agrícolas, além de poder visualizar os dados da cultura em mapas agrícolas que auxiliam o agricultor na gestão do uso da água na irrigação.

O uso dos coeficientes de cultivo obtidos pelo NDVI fornece um meio alternativo para avaliar o estande da cultura, sanidade das plantas, estimativa da produtividade além de poder quantificar sua ET_c (BASTIAANSEN et al., 2012). As informações do NDVI, integradas com modelos matemáticos, permitem o desenvolvimento eficiente das curvas do K_c e do K_{cb} com valores médios representativos das áreas de interesse. Como observado por Pôças et al. (2015) e Mateos et al. (2013), a integração das informações dos índices de vegetação (IV) com os dados da fração da cobertura da planta permite um melhor ajuste do K_{cb} em casos onde a cobertura do solo pela planta não é total, como em culturas florestais, frutíferas, ou em estádios do desenvolvimento onde a vegetação não cobre totalmente o solo (culturas agrícolas de ciclo anual).

Portanto, o estabelecimento de uma relação entre o K_c e o K_{cb} com NDVI é uma área de pesquisa em expansão, devido as diversidades das culturas, variáveis climáticas e regiões que ainda não foram concebidas as calibrações na estimativa da ET_c mais próximas a campo. Os dados provindos do processamento de imagens orbitais vêm contribuir para melhor ajustar os parâmetros da irrigação e calcular a demanda hídrica cultural, possibilitando o uso racional da água em sistemas produtivos agrícolas no Sul do Brasil.

Desta maneira, o presente estudo tem como objetivos: (I) Estimar a demanda ET_c do milho por meio dos coeficientes de cultivo, obtidos pelo processamento de imagens satelitais e pelo modelo de balanço hídrico do solo, em três áreas irrigadas por pivô central nos anos agrícolas 2013/14, 2014/15 e 2016/17; (II) Avaliar os cenários da irrigação utilizando os indicadores de produtividade da água como a WP e a WP_{irrig} para as três áreas irrigadas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização do meio físico

O estudo foi conduzido na Agropecuária Cechin, propriedade localizada no município de Júlio de Castilhos – RS, Brasil, sob as coordenadas geográficas de latitude 29°11'53" Sul e longitude 53°36'21" Oeste, com uma altitude média de 407 metros (Figura 01).

A área está inserida em uma região com cultivo extensivo do milho, soja, trigo e canola. O clima é classificado como subtropical úmido do tipo Cfa (KUINCHTNER e BURIOL, 2001; KOTTEK et al., 2006), com precipitação média anual de 1.755 mm. Neste estudo foram analisadas três áreas irrigadas por pivô central com a cultura do milho, semeadas sob sistema de plantio direto, sendo área A, localizada na latitude 29°11'33.7" Sul e longitude 53°36'9.3" Oeste, área B localizada na latitude 29°11'14.2" Sul e longitude 53°36'27.2" Oeste, e área C localizada na latitude 29°10'2.0" Sul e longitude 53°34'56" Oeste, onde cobriram uma área de 76,8ha, 17,2ha e 30,7ha respectivamente.

As três áreas irrigadas estão inseridas em uma região de sobreposição das imagens do Sensor OLI de aproximadamente 15 km nas órbitas 222/80 e 223/80, ilustradas pelos retângulos verdes na Figura 01.

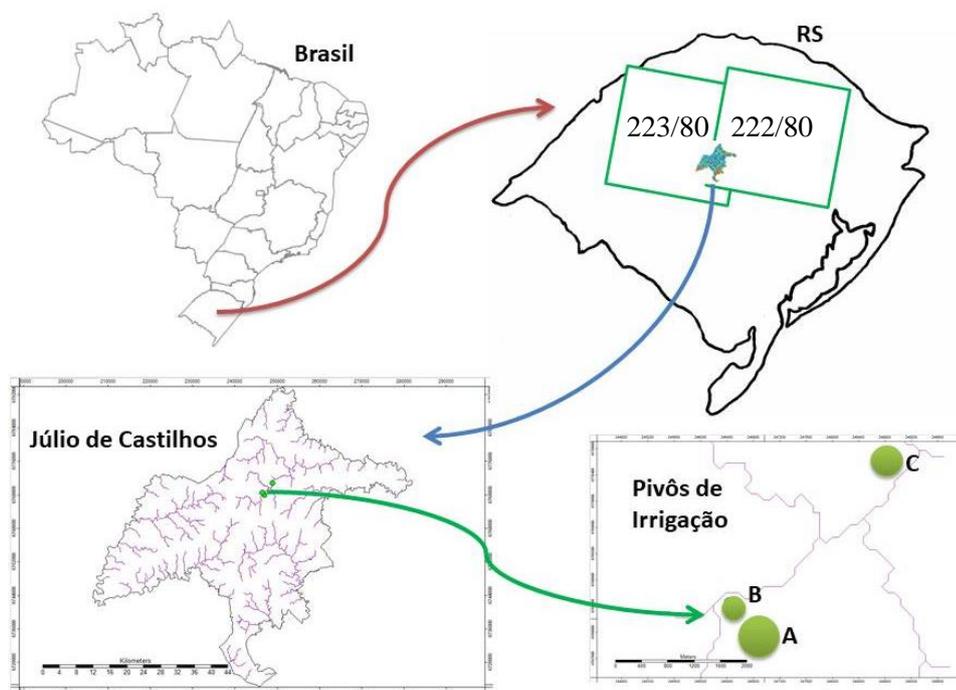


Figura 01. Localização das três áreas irrigadas por pivô central, denominadas A, B e C, inseridas em uma área de sobreposição das imagens do Sensor OLI, no município de Júlio de Castilhos – RS, Brasil.

No ano agrícola de 2013/14 foi semeado nas três áreas o híbrido do milho Agroceres (AG 9025), e nos anos agrícolas de 2014/15 e 2016/17 foi semeado o híbrido do milho Pioneer (P-1630), com uma densidade aproximada de 85 mil plantas por hectare. O solo das três áreas irrigadas é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico (úmbrico) segundo Streck et al. (2008).

2.1.1 Informações de campo e dados climatológicos

As informações de campo, como a data de semeadura, estádios fenológicos das plantas, altura de plantas, população de plantas, características físicas dos solos, precipitações pluviais e as irrigações aplicadas, foram disponibilizadas pelo Sistema Irriga[®], vinculado a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), que gerencia o manejo e monitoramento das irrigações nas áreas estudadas. A fenologia da cultura do milho foi realizada por meio da identificação visual do desenvolvimento da planta, conforme metodologia de Ritchie et al. (1993), e pela medição da altura das plantas em pontos representativos das três áreas irrigadas. Estas avaliações foram realizadas por técnicos do Sistema Irriga[®] que realizam vistorias a campo, a cada 15 dias aproximadamente, para coletar dados reais da cultura na obtenção da demanda evapotranspirativa, pelo método de balanço hídrico do solo.

As informações como a data de semeadura, a população de plantas, as precipitações pluviais e as irrigações aplicadas foram coletadas pelo agricultor, estas inseridas no banco de dados do Sistema Irriga e disponibilizados para a elaboração deste estudo. A caracterização física do solo foi realizada a partir da coleta de amostras de solo indeformadas e deformadas, sendo encaminhadas ao laboratório de solos do Sistema Irriga[®] para determinação dos atributos físicos.

Os dados meteorológicos como: registros diários de umidade relativa do ar, temperatura do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar foram obtidos pela estação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET - A886). Esses dados foram utilizados para determinar os graus-dia acumulado (GDD), quantidade de energia acumulada acima da temperatura-base (10°C), favorável ao desenvolvimento da cultura do milho (GILMORE e ROGERS, 1958) e para estimativa da ETo, calculada utilizando o método FAO Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

A seguir são apresentadas as fases fenológicas da cultura do milho para as três áreas irrigadas (Tabela 01).

Tabela 01. Fases fenológicas, altura de planta e graus-dia acumulado identificados para as três áreas irrigadas no município de Júlio de Castilhos-RS, Brasil.

Ano Agrícola 2013/2014				Ano Agrícola 2014/2015			Ano Agrícola 2016/2017		
Área irrigada A									
Fases	Data	h (m)	GDD	Data	h (m)	GDD	Data	h (m)	GDD
Inicial	07/09/13	0,0	9	21/08/14	0,0	7	23/08/16	0,0	6
Des. rap	07/10/13	0,5	201	20/09/14	0,3	216	03/10/16	0,3	219
Médio	28/11/13	2,2	773	13/11/14	2,1	730	17/11/16	2,0	752
Final	14/01/14	2,3	1420	01/01/15	2,2	1351	27/12/16	2,2	1357
Área irrigada B									
Inicial	07/09/13	0,0	9	21/08/14	0,0	7	23/08/16	0,0	6
Des. rap	11/10/13	0,6	237	22/09/14	0,2	210	02/10/16	0,4	213
Médio	27/11/13	2,0	759	13/11/14	2,0	730	18/11/16	2,1	760
Final	13/01/14	2,3	1415	31/12/14	2,2	1331	24/12/16	2,2	1244
Área irrigada C									
Inicial	10/09/13	0,0	12	22/08/14	0,0	8	26/08/16	0,0	7
Des. rap	15/10/13	0,5	252	22/09/14	0,15	227	06/10/16	0,3	244
Médio	29/11/13	2,1	773	10/11/14	1,9	743	15/11/16	2,0	732
Final	11/01/14	2,2	1396	31/12/14	2,2	1361	25/12/16	2,2	1249

Onde: Fases – fases de desenvolvimento da cultura do milho; Data – data do início de cada estágio fenológico; h - altura da planta (m); e GDD – graus-dia acumulado.

As fases de desenvolvimento do milho foram determinadas de acordo com Allen et al. (1998), sendo: (i) fase inicial, da semeadura até o dossel da planta cobrir aproximadamente 10% da superfície do solo; (ii) fase de desenvolvimento rápido, de 10% de cobertura do solo até a cultura atingir a cobertura plena; (iii) fase intermediária, a partir da cobertura plena até o início da maturação; e (iv) fase final de desenvolvimento, da maturação fisiológica da cultura do milho até a colheita.

As amostras de solo coletadas nas três áreas irrigadas foram submetidas à metodologia descrita por Michelin et al. (2010) para obtenção dos dados da umidade do solo na capacidade de campo. Onde as amostras de solo indeformadas são inseridas no extrator de água, idealizado por Richards (1949), assim obteve-se o teor de água no solo para o potencial de -10 kPa. Para obter informações do teor de água do solo no ponto de murcha permanente, para o potencial de -1500kPa, foi determinado utilizando amostras de solo com estrutura deformada, em câmaras de um potenciômetro de ponto de orvalho, WP4 (marca: DECAGON, Devices, Inc).

Na Tabela 02 são apresentadas as propriedades físicas e hidráulicas dos solos por camadas, para as três áreas irrigadas, determinadas no laboratório de solos do Sistema Irriga[®] - UFSM.

Tabela 02. Características físicas e hidráulicas dos solos encontrados nas três áreas irrigadas: A, B e C.

Classe textural das áreas irrigadas				
Camada (m)	Classe Textural	DS (g/cm ³)	CC (cm ³ /cm ³)	PMP (cm ³ /cm ³)
Área irrigada (A)				
0,00 – 0,25	Franco	1,52	0,361	0,170
0,25 – 0,50	Franco argiloso	1,46	0,356	0,170
0,50 – 0,70	Franco argiloso	1,41	0,357	0,180
Área irrigada (B)				
0,00 – 0,25	Franco	1,61	0,316	0,170
0,25 – 0,50	Franco argiloso	1,36	0,379	0,180
0,50 – 0,70	Franco argiloso	1,31	0,392	0,190
Área irrigada (C)				
0,00 – 0,25	Franco argilo arenoso	1,58	0,292	0,160
0,25 – 0,50	Franco argiloso	1,39	0,288	0,150
0,50 – 0,70	Franco argiloso	1,37	0,316	0,190

Sendo: DS - densidade aparente do solo (g/cm³), CC – umidade na capacidade de campo e PMP – umidade no ponto de murcha permanente (cm³/cm³).

2.2 Modelo SIMDualKc

O modelo SIMDualKc, desenvolvido por Rosa et al. (2012), utiliza a abordagem do Kc dual para fornecer informações que auxiliam no manejo da irrigação, inclusive em situações de déficit hídrico. O SIMDualKc é um modelo que estima os parâmetros do balanço hídrico diário do solo com dados de campo, além de calcular a ETc de maneira fracionada, separando a evaporação da água contida na superfície do solo e a transpiração da cultura, o que permite uma melhor definição do manejo de irrigação em áreas que utilizam resíduos culturais na superfície do solo. O modelo de simulação do balanço hídrico do solo, quando adequadamente calibrado, é uma ferramenta importante para calcular o requerimento hídrico cultural e melhorar as práticas de manejo da irrigação, que contribui para o aumento na produtividade das culturas.

O modelo SIMDualKc necessita de informações de campo observados como: altura da planta, fração de cobertura (*fc*), lâminas de irrigação, precipitações, profundidade do sistema radicular, estádios vegetativos da cultura; parâmetros não observados como: os Kcb para os três estádios principais da cultura (inicial, intermediário e final), a fração de depleção da água sem

estresse (p); parâmetros que caracterizam a evaporação da água no solo sendo: água evaporável total (TEW), água facilmente evaporável (REW), camada evaporável do solo (Z_e); e parâmetros para estimar a percolação profunda (aD e bD) descritos por Liu et al. (2006) para realizar a simulação do balanço hídrico do solo.

Os valores calibrados de K_{cb} e p , utilizados nas simulações iniciais do modelo SIMDualKc, foram obtidos de Giménez et al. (2016), assim como os valores de REW, TEW e Z_e e, por fim, parâmetros para estimar a percolação profunda (aD e bD), descritos por Liu et al. (2006). Não foi considerado a contribuição de águas subterrâneas por não haver elevação do lençol freático nas áreas estudadas no município de Júlio de Castilhos, RS.

2.3 Dados de sensoriamento remoto

As imagens utilizadas neste estudo foram do Sensor OLI, da plataforma Landsat 8, onde foi possível cobrir os três anos agrícolas de 2013/14, 2014/15 e 2016/17 para a cultura do milho, sendo definido um período de setembro de 2013 a janeiro de 2017 para obtenção das imagens que cobriram as três áreas irrigadas, não foi possível realizar o estudo no ano agrícola 2015/16 pois a cultura do milho foi danificada pelo fenômeno da geada no estágio inicial de desenvolvimento na área estudada. No período considerado, foram alcançadas 23 imagens com uma resolução espacial de 30m com baixo e nulo índice de cobertura de nuvens nas órbitas 222/80 e 223/80. A existência de uma área de sobreposição (≈ 15 km), entre as duas órbitas sobre a área de estudo (Figura 01), possibilitou obter maior número de imagens e informações para o período desejado. Porém, isso não significa que seja possível à obtenção de imagens com um intervalo menor que 16 dias, resolução temporal para o sensor imagear a mesma órbita e ponto, e sim, que a probabilidade de se obter boas imagens com maior frequência temporal é aumentada.

Para cobrir os três ciclos da cultura do milho, com imagens satelitais, foram consideradas seis datas para o ano agrícola 2013/14: 13/09/2013, 08/10/2013, 16/11/2013, 25/11/2013, 18/12/2013 e 19/01/2014; dez datas para o ano agrícola 2014/15: 24/08/2014, 09/09/2014, 16/09/2014, 25/09/2014, 02/10/2014, 27/10/2014, 28/11/2014, 05/12/2014, 06/01/2015 e 22/01/2015; e sete datas para o ano agrícola 2016/17: 14/09/2016, 21/09/2016, 07/10/2016, 23/10/2016, 24/11/2016, 04/01/2017 e 11/01/2017.

As imagens do sensor OLI foram obtidas do *site* da USGS (*United States Geological Survey*). Inicialmente, foi realizada uma pesquisa por órbita e ponto sobre as imagens disponíveis no período analisado, no banco de imagens do *site*. As imagens do sensor OLI

precisam passar por um processamento digital, em que são utilizados os SIG(s), para obtenção dos valores de radiância, refletância, temperatura de superfície, índices de vegetação dentre outros. Neste estudo foi definido o SAGA GIS (Sistema de Análise Geocientífica Automática) para realizar os procedimentos necessários na obtenção dos dados de NDVI para os três ciclos culturais em cada área analisada.

Após a seleção das imagens satelitais de interesse para o estudo e definido o SIG, foi realizado os processamentos digitais das imagens do Sensor OLI. Estes procedimentos são necessários para calcular os valores de NDVI e os coeficientes de cultivo, como o Kcb NDVI e o Kc NDVI para estimativa da ETc NDVI em cada estágio vegetativo do milho.

As imagens adquiridas do Sensor OLI foram dos produtos de Nível 1 (L1T, com dados do terreno corrigidos geometricamente e radiometricamente). O sistema de coordenadas atribuído de saída é o *Universal Transverse Mercator* (UTM), com o datum *World Geodetic System 1984* (WGS84). O datum e o erro de geolocalização circular é < 12 (m) para cada imagem, com nível de confiança de 90% (PEÑA e BRENNING, 2015; ROY et al., 2014).

O processamento digital das imagens satelitais realizado no SAGA GIS inclui: conversão dos valores brutos da imagem para refletância, correção atmosférica e procedimentos matemáticos para estimar os valores do NDVI, do Kcb NDVI, do Kc NDVI e a da ETc NDVI nas três áreas irrigadas por pivô central. Um dos procedimentos realizados na calibração radiométrica seguiu os métodos descritos em Li et al. (2016) em que são utilizados os valores brutos da imagem (nível digital) e transformados em refletância (valores físicos). As propriedades da refletância espectral definem a intensidade da resposta espectral de cada pixel em uma determinada banda espectral, para a área estudada.

O seguinte procedimento foi a correção atmosférica, que visa reduzir os efeitos ocasionados pela coluna de vapor d'água, profundidade óptica das nuvens, aerossol, quantidade de CO₂ na atmosfera. Porém para obtenção destes dados são necessárias informações de CO₂, dados climáticos *in loco* no momento da passagem do satélite, os quais não foram possíveis neste estudo, sendo assim, definida a correção atmosférica pelo método proposto por Chavez (1988), em que utiliza a subtração de objeto escuro das imagens avaliadas.

Após a realização das conversões e correções das imagens satelitais é calculado o NDVI para cada data de imageamento. O NDVI é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação em tempo atual, onde são utilizadas as bandas espectrais B4 – Banda do vermelho visível (0.64 - 0.67 μm), e B5 – Banda do infravermelho próximo (0.85 - 0.88 μm), para formar as imagens de índices de vegetação. Sendo o NDVI calculado pela equação 01 (ROUSE et al., 1974).

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} \quad (01)$$

Onde: ρ_{nir} é a refletância da banda do infravermelho próximo, ρ_{red} é a refletância da banda do vermelho visível.

Para obter estimativas dos valores do Kcb NDVI e do Kc NDVI foram utilizados os valores médios do NDVI para cada data da passagem do satélite, em cada área irrigada. As equações utilizadas para obter os dados de Kcb e Kc pelo NDVI basearam-se na metodologia proposta por Pôças et al. (2015), conforme as equações a seguir:

$$Kcb \text{ NDVI} = Kcmin + Kd \left(\frac{VIi - VImin}{VI_{max} - VImin} \right) \quad (02)$$

Onde: Kc min é o mínimo valor de Kc para o solo nu (na ausência de vegetação). O valor de Kc min é de 0,15 em condições agrícolas típicas e varia de 0,0 a 0,15 para a vegetação nativa, dependendo da frequência das precipitações (ALLEN e PEREIRA, 2009); Kd é o coeficiente de densidade que permite incorporar o impacto da densidade e altura da vegetação na estimação do Kcb; VIi corresponde ao NDVI médio da área irrigada para uma data de imagem satelital; VI_{max} é o NDVI para a cobertura vegetal máxima, ajustado para 0,85 para as três áreas agrícolas; e VI_{min} é NDVI para cobertura mínima da vegetação (solo desnudo), ajustado para 0,15 neste estudo (CALERA et al., 2004, 2017; MADUGUNDU et al., 2017).

O coeficiente de densidade (Kd), utilizado na equação 02, foi proposta por Allen e Pereira (2009) onde é calculado utilizando dados da fração de cobertura do solo e da altura da planta conforme a equação 03 a seguir:

$$Kd = \min \left(1, MI \cdot fc \cdot eff, fc \cdot eff \left(\frac{1}{1+h} \right) \right) \quad (03)$$

Onde: $fc \cdot eff$ é a fração da superfície do solo efetivamente coberta ou sombreada pela vegetação [0,01 - 1] próximo do meio-dia solar, h é a altura da cultura (m), e MI é um multiplicador de $fc \cdot eff$ que descreve o efeito da densidade do copado no sombreamento e no valor máximo da evapotranspiração por fração de solo sombreado.

A partir dos resultados alcançados pelo K_{cb} NDVI para os três estádios vegetativos (inicial, intermediário e final), foram calculados os valores do K_c NDVI, onde o K_c pode ser separado nos parâmetros do K_{cb} e do K_e pelo método do K_c dual, conforme demonstrado na equação 04.

$$K_c NDVI = K_{cb} NDVI + K_e \quad (04)$$

Onde: K_{cb} NDVI é o coeficiente de cultura basal derivado do NDVI; o K_e é o coeficiente de evaporação do solo obtido pelo modelo $SIMDualK_c$, para as datas que foram adquiridas as imagens satelitais.

Como o K_e utilizado na estimativa do K_c NDVI é computado pelo modelo $SIMDualK_c$, os resultados da relação do K_c NDVI com K_c $SIMDualK_c$ são de alguma forma influenciados pelos valores de K_e , que são os mesmos em ambos os casos. No entanto, esta adequação não impede a avaliação do cálculo do K_c NDVI porque este é um dos procedimentos que permite comparar os K_c de ambas as abordagens e obter informações do NDVI das áreas agrícolas. Desta maneira, é possível obter a estimativa da ET_c NDVI, para cada ciclo de cultivo, combinando os valores do K_c NDVI com os dados da ET_o (Equação 05).

$$ET_c NDVI = K_c NDVI * ET_o \quad (05)$$

Onde: K_c NDVI é o coeficiente de cultura derivado do NDVI, ET_o é a evapotranspiração da cultura de referência obtida com dados climatológicos locais.

2.4 Produtividade da água

Para avaliar os cenários da irrigação, em sistemas irrigados por pivô central, podem ser utilizados os indicadores de produtividade da água como a WP e a WP_{irrig} (PEREIRA et al., 2012) que são apresentadas nas equações 06a e 06b:

$$WP = \frac{Y_a}{TWU} \quad (06a)$$

$$WP_{irrig} = \frac{Ya}{IWU} \quad (06b)$$

Onde: WP é a produtividade total da água; WP_{irrig} é a produtividade da água da irrigação; Ya é a produtividade média de grãos em kg/ha; TWU é o uso total da água pela irrigação e precipitação; e IWU é o uso da água pela irrigação, utilizada em cada ciclo da cultura.

2.5 Análise estatística

Foram utilizados parâmetros estatísticos qualitativos de modo a obter uma percepção das tendências da modelação dos valores encontrados pela ETc derivada do NDVI e os valores estimados pela ETc do modelo SIMDualKc ao longo dos três ciclos da cultura do milho. Como indicadores do ajuste, entre a ETc obtida pelo processamento das imagens satelitais e a ETc estimada pelo modelo SIMDualKc, foram usados inicialmente o coeficiente de regressão (b_0) (EISENHAUER, 2003) e o coeficiente de determinação (R^2). Quando o resultado dos valores encontrados para o b_0 for próximo de 1,0, indica que a ETc encontrada pelo NDVI é estatisticamente próxima a ETc estimada pelo modelo SIMDualKc. Onde o R^2 se aproximar do valor 1,0, representa que a maior parte da variância dos valores calculados pela ETc NDVI é próxima a variância dos valores estimados pela ETc obtida pelo modelo SIMDualKc.

Para avaliar os resultados gerados pelo processamento das imagens orbitais comparativamente aos encontrados pelo modelo SIMDualKc, foi necessário realizar um conjunto de indicadores de erros de estimativas residuais, que são descritos a seguir:

A raiz quadrada do erro médio (RMSE) expressa a variância dos erros residuais encontrados, conforme Equação 07.

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n} \right]^{0,5} \quad (07)$$

O valor de RMSE pode variar entre 0,0, quando um ajuste perfeito ocorrer, e um valor positivo, menor que a média de observações pode ser esperada.

O erro absoluto médio (AAE), que expressa o tamanho médio dos erros estimados.

O erro relativo médio (ARE), expressa os erros de cálculo como uma porcentagem dos valores de observação (MORIASI et al., 2007).

A porcentagem de viés (PBIAS) que mede a tendência média dos dados simulados pode ser maior ou menor do que as observações correspondentes. O valor ideal de PBIAS é 0,0; valores próximos de 0,0 indicam uma concordância da ETc obtida pelo NDVI e a ETc estimada pelo modelo SIMDualKc. Valores positivos ou negativos referem-se à ocorrência de um viés de sobre ou sub avaliação.

Para encontrar a eficiência de modelagem (EF), utilizada para determinar a magnitude relativa da variância residual da ETc estimada pelo NDVI em comparação com a variância dos dados da ETc SIMDualKc, foi aplicada a equação 08 (MORIASI et al., 2007).

$$EF = 1,0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (08)$$

O valor esperado para o cálculo da EF é 1,0, valores próximos de 1,0 indicam que a variância dos resíduos das simulações é inferior à variância dos resíduos das observações, portanto, que o desempenho do modelo é muito bom. Em contrapartida, quando EF é perto de zero ou negativa, justificando que não há nenhum proveito na utilização da metodologia.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estimativas dos coeficientes de cultivo do milho

Foram estimados os coeficientes de cultivo pelo modelo SIMDualKc, como o Kc, Kcb, Ke; também foram estimados os valores médios do Kcb, a partir do NDVI pelo processamento de imagens satelitais nos três estádios da cultura do milho (inicial, intermediário e final). A partir dos resultados encontrados pelo modelo SIMDualKc e pelo processamento das imagens satelitais foram elaborados três gráficos com os parâmetros de irrigação, de acordo com cada estágio fenológico da cultura. Na Figura 02 é apresentada um gráfico para cada ano agrícola, para ilustrar o comportamento espaço temporal dos parâmetros de irrigação, pois não foram identificados estresse hídrico cultural para os anos analisados, onde a demanda evapotranspirativa da cultura foi atendida pelas precipitações e irrigações complementares.

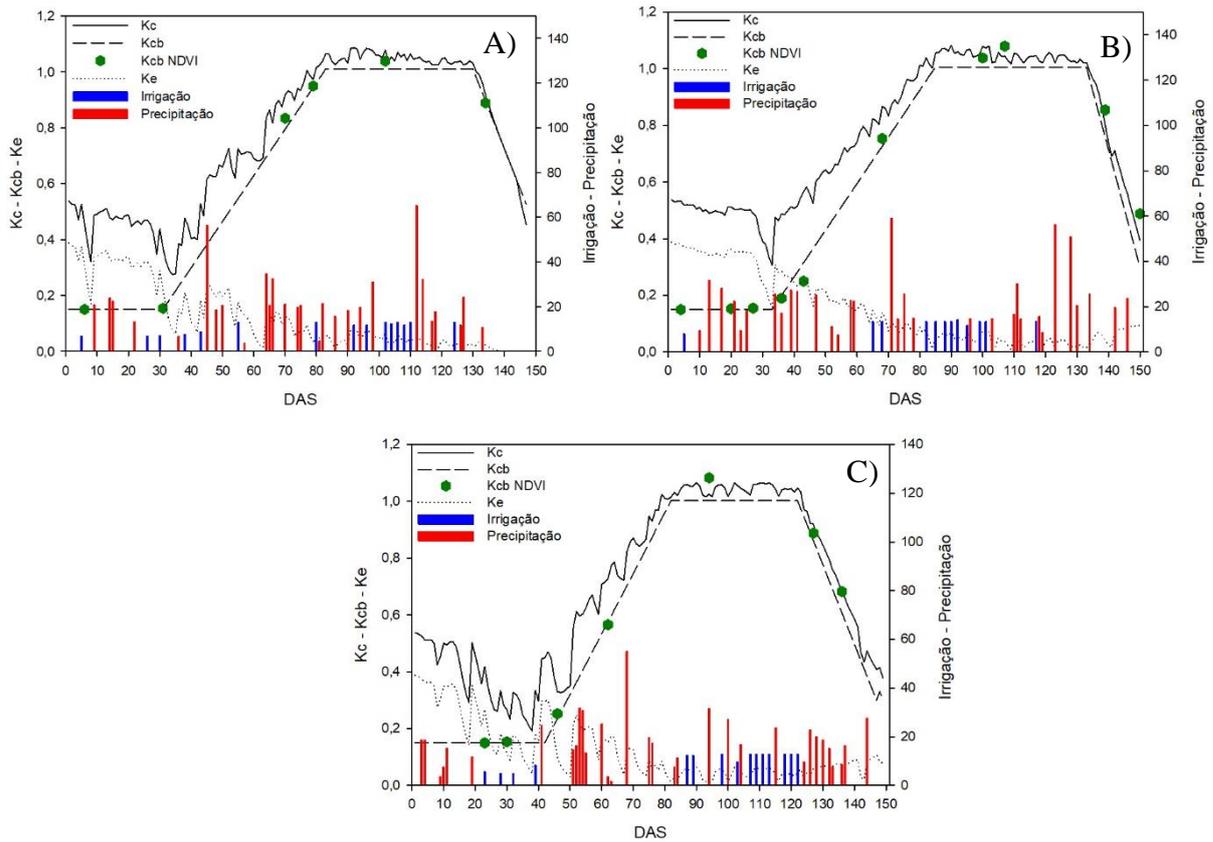


Figura 2. Variação diária dos parâmetros de irrigação determinados pelo modelo SIMDualKc e pelo processamento de imagens satelitais para a área irrigada A no ano agrícola de 2013/14; área irrigada B para o ano agrícola de 2014/15; e área irrigada C para o ano agrícola 2016/17, respectivamente. Sendo: K_c - coeficiente de cultura; K_{cb} NDVI - coeficiente de cultura basal derivada do NDVI; K_e - coeficiente de evaporação da água do solo; K_{cb} - coeficiente de cultura basal; as barras verticais em azul indicam as irrigações aplicadas e as barras em vermelho as precipitações pluviiais (mm).

Analisando o comportamento dos valores do K_e , verifica-se que no estágio inicial do desenvolvimento da cultura, seu valor variava em torno de 0,38 para os três anos avaliados, considerado alto pelo fato de haver maior exposição do solo a radiação solar nesta fase, favorecendo a evaporação da água na superfície do solo. Os valores iniciais obtidos pelo K_e estão de acordo com os resultados encontrados por Wei et al. (2014), Paredes et al. (2014), Pereira et al. (2015) que também constataram alta a evaporação do solo, no estágio inicial da cultura, devido à exposição do solo a radiação solar.

Os valores de K_e apresentam variações nas três áreas, relacionados aos eventos de precipitações ou de irrigações. Entretanto, são pouco evidentes quando a cultura apresenta-se em seu estágio vegetativo médio, onde a superfície do solo está quase totalmente sombreada pela cultura, ou seja, a f_c em torno de 84%. A f_c máxima do milho ocorreu aos 81 dias após a

semeadura (DAS) na área irrigada C no ano agrícola 2016/17, onde o Kcb estimado pelo modelo SIMDualKc apresentou valor de 1,02 e o Ke de 0,01.

Os processos evaporativos da água no solo, por sua vez, são influenciados por uma série de fatores que afetam a superfície do solo, tais como o manejo e preparo do solo para a semeadura que interfere na rugosidade de superfícies, remoção da cobertura vegetal, desestruturação dos agregados, sombreamento pela cultura que vai depender da densidade e da altura das plantas, além da umidade e disponibilidade de energia solar sobre a superfície do solo (ALLEN et al., 1998, 2005^b; ALLEN e PEREIRA, 2009).

Com relação aos valores de Kcb obtidos pelo modelo SIMDualKc, foram observados valores de Kcb ini de 0,15 e Kcb med de 1,0 a 1,02 para as três áreas avaliadas. Martins et al. (2013) realizando pesquisa com a cultura do milho utilizando irrigação plena e deficitária, no município de Santa Maria - RS, calibraram valores para Kcb e obtiveram valores para Kcb ini = 0,20 e Kcb med = 1,12. Miao et al. (2016) realizando estudo com o modelo de balanço hídrico em Hetao - Mongólia encontraram valores de Kcb ini = 0,10 e Kcb med = 1,15 para a cultura do milho. Valores de Kcb próximos e acima aos encontrados neste estudo realizado em Júlio de Castilhos – RS, Brasil.

Na área irrigada B no ano agrícola 2014/15 foram observados valores de Kcb NDVI (ini) de 0,15 e Kcb NDVI (med) de 1,08 obtidos com dados do Sensor OLI, valores estes próximos aos observados por Calera et al. (2017) que encontraram valores de Kcb (ini) = 0,16 e Kcb (med) = 0,95, obtidos com índice de vegetação (IV) para a cultura do milho, em pesquisa realizada em Albacete, Espanha. Campos et al. (2017) realizando estudos com as imagens dos sensores TM e ETM, plataforma Landsat, para obter dados de IV para híbridos de milho, em Nebraska - Estados Unidos, encontraram valores de Kcb IV (ini) de 0,15 e Kcb IV (med) de 0,95. Levando em consideração que os estudos relacionados estão em outras posições geográficas, somadas a condições diversas do clima e precipitações, o comportamento dos estádios vegetativos relacionados ao IV obtiveram resultados semelhantes para a mesma cultura, uma vez que as informações encontradas pelo IV são sensíveis às características locais da cultura e do clima. Os valores do Kcb (end), por sua vez, dependem essencialmente do manejo da cultura, antes da colheita e, desta forma, de acordo com Wei et al. (2014), são difíceis de serem comparados.

Os valores do Kc obtidos pelo modelo SIMDualKc apresentaram valores de Kc (ini) = 0,38 e Kc (med) = 1,04 para área irrigada A, no ano agrícola 2013/14. Facchi et al. (2013) realizando estudos com métodos diretos e indiretos para estimativa da ETc do milho no norte da Itália, em Landriano, obtiveram valores de Kc (ini) = 0,28 e Kc (med) = 1,14, onde

identificaram que os resultados obtidos pelo método FAO-56, com coeficientes de cultura generalizados, superestimaram a demanda ETC especialmente durante o estágio vegetativo médio.

Na Tabela 03, são apresentados os valores do Kc estimados pelo modelo SIMDualKc e os valores de Kc obtidos pelo NDVI para as três áreas irrigadas, identificados para os três estádios principais da cultura (inicial, intermediário e final). Os valores dos Kc estimados pelo modelo SIMDualKc estão submetidos as datas em que foram possíveis obter dados do Sensor OLI sendo: quando a cultura encontrava-se em estágio vegetativo inicial, estágio vegetativo médio e estágio final, para as três áreas estudadas.

Tabela 03. Kc estimados pelo modelo SIMDualKc e Kc calculados pelo NDVI para as três áreas irrigadas A, B e C, nos três anos agrícolas avaliados 2013/14, 2014/15 e 2016/17 no município de Júlio de Castilhos – RS, Brasil.

Parâmetros	Áreas irrigadas por pivô central									Média
	Ano Agrícola 2013/2014			Ano Agrícola 2014/2015			Ano Agrícola 2016/2017			
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Kc (ini)	0,38	0,43	0,53	0,53	0,53	0,54	0,45	0,45	0,46	0,48
Kc (med)	1,04	1,05	1,05	1,08	1,04	1,07	1,07	1,08	1,06	1,06
Kc (final)	0,88	0,79	0,80	0,47	0,39	0,40	0,66	0,58	0,61	0,62
Kc NDVI (ini)	0,38	0,43	0,53	0,54	0,53	0,54	0,45	0,45	0,46	0,48
Kc NDVI (med)	1,07	1,03	1,07	1,17	1,12	1,19	1,15	1,15	1,14	1,12
Kc NDVI (final)	0,90	0,91	0,92	0,46	0,58	0,56	0,58	0,58	0,77	0,70

Onde: Kc é o coeficiente de cultura; NDVI é o índice de vegetação por diferença normalizada. São apresentados também os valores em cada estágio de desenvolvimento do milho sendo: (ini) inicial, (med) intermediário e (final) final para os três anos agrícolas.

Os valores de Kc (ini) estimados pelo modelo SIMDualKc variaram de 0,38 a 0,54 para as três áreas irrigadas nos três anos agrícolas. Valores estes próximos aos encontrados pelo Kc NDVI (ini), onde foram obtidos valores de 0,38 a 0,54, demonstrando uma similaridade no comportamento inicial para o Kc do milho em ambas as metodologias, onde a cultura encontrava-se com uma fração de cobertura de até 10% da superfície do solo.

Avaliando as estimativas do Kc (med), observa-se que os dados encontrados pelo NDVI apresentaram valores de 1,03 a 1,19, estes acima aos valores estimados pelo Kc (med) do modelo SIMDualKc. Mesmo os valores de Kc NDVI (med) incorporando dados do Ke a partir do modelo SIMDualKc, apresentaram maiores valores, devido à sensibilidade da planta em resposta ao comportamento espectral identificado pelo NDVI, quando a cultura atingiu sua cobertura plena, na fase intermediária.

Os Kc (med) estimados pelo modelo SIMDualKc, apresentaram valores de 1,04 a 1,08 mostrando-se próximos e acima aos relatados Wang et al. (2017) que realizaram estudos para estimar a evapotranspiração real do milho, em uma região semiúmida e propensa à seca na China, onde encontraram valores do Kc med = 0,96 para o ano de 2013. Farahani et al. (2007) observaram que os valores do Kc precisam ser adaptados de acordo com as condições da planta, do clima, dos métodos de pesquisa, da localização da área do estudo, do manejo da cultura, e dos métodos de avaliação para estimativa da ETc, que podem gerar diferenças nos resultados encontrados.

Toureiro et al. (2017) realizando pesquisas, em pivô central, com a cultura do milho encontraram um valor de Kc IV (med) de 1,20 em condição de clima mediterrâneo, utilizando imagens do sensor TM, da plataforma Landsat 5. Pôças et al. (2015) obtiveram valores de Kc IV (med) = $0,98 \pm 0,11$ com imagens dos sensores TM e ETM⁺, da plataforma Landsat. Teixeira et al. (2014) realizando pesquisas para alcançarem estimativas da ETc a partir do Kc para a cultura do milho, obtidas por imagens satelitais em pivô central, encontraram um Kc IV (med) = 1,12 utilizando o sensor TM.

Os resultados encontrados, para a estimativa do Kc NDVI neste estudo, indicaram uma similaridade com os valores relatados na literatura, que utilizaram imagens orbitais para acompanhar os estádios vegetativos da cultura do milho, com intenção de estimar a demanda hídrica cultural. Constatando que os índices vegetativos caracterizam a realidade singular no desenvolvimento para os três estádios principais da cultura em cada área estudada, pela assinatura espectral da cultura. Onde os valores de NDVI são diferenciados pelo manejo dos sistemas irrigados, sanidade das plantas, espaçamento entre plantas, variedade da cultura, dentre outros fatores, que influenciam a resposta espectral das plantas nos sistemas produtivos, que são identificados pelos sensores remotos (KAMBLE et al., 2013).

3.2 Produtividade da cultura e produtividade da água

Neste estudo, os dados de produtividade da cultura do milho variaram de 13.550 a 13.800 kg/ha no ano agrícola de 2013/14, para o híbrido AG 9025, e alcançou uma produtividade de 13.180 a 13.320 kg/ha nos anos agrícolas 2014/15 e 2016/17 para o híbrido P-1630. Os valores de produtividade encontrados neste estudo, obtidos pelo produtor, estão próximos da média estimada para a região estudada, que é de 14.000 kg/ha para o híbrido AG 9025 e 13.200 kg/ha para híbrido P-1630.

A seguir são apresentados os resultados da produtividade da cultura e a produtividade da água para as três áreas estudadas (Tabela 04).

Tabela 04. Produtividade da água calculada para as três áreas irrigadas, nos três anos agrícolas 2013/14, 2014/15 e 2016/17.

Produtividade da água						
Ano	Prod.	Irrig.	Precip.	ETc	WP	WPirrig
Área irrigada A						
2013/14	13800	181,7	853	521,4	1,33	7,59
2014/15	13320	187,6	1116	460,7	1,02	7,10
2016/17	13200	153,6	788	412,6	1,40	8,59
Área irrigada B						
2013/14	13650	176,8	854	515,8	1,32	7,72
2014/15	13300	158,3	1110	451,2	1,05	8,40
2016/17	13180	174,8	780	399,7	1,38	7,54
Área irrigada C						
2013/14	13550	145,2	860	502,3	1,35	9,33
2014/15	13300	164,1	1136	466,8	1,02	8,10
2016/17	13200	166,9	790	396,6	1,38	7,91

Sendo: Prod. – produtividade do milho (kg/ha); Irrig. - irrigação aplicada (mm); Precip. - precipitação pluvial (mm); ETc - evapotranspiração da cultura (mm); WP - produtividade total da água (kg/m³); e WPirrig - produtividade da água de irrigação (kg/m³).

Os resultados da WP apresentaram valores de 1,02 a 1,40 kg de grãos de milho por m³ de água utilizada, para os três anos agrícolas avaliados nas três áreas irrigadas, em contrapartida quando se calcula a WPirrig os valores encontrados variam de 7,10 a 9,33 kg/m³. Rodrigues et al. (2013) realizaram estudos com irrigação deficitária e complementar no município de Santa Maria – RS, Brasil, obtiveram uma WPirrig variando de 3,07 a 10,05 kg/m³, valores abaixo e próximos aos encontrados neste estudo. Das et al. (2018), trabalhando com sistemas conservacionistas obtiveram uma WPirrig = 1,12 kg/m³ em Nova Deli, Índia, em 2010, para sistemas de plantio direto. Este valor obtido por Das et al. (2018) contrasta com os resultados encontrados neste estudo para WPirrig, pois houve uma maior aplicação da água na irrigação em Nova Deli que chegou a 467 mm, comparados aos 145,2 mm de irrigação aplicada para a área irrigada C no ano agrícola 2013/14 para produção da cultura do milho.

A estimativa da ETc do milho obtida pelo modelo SIMDualKc na área irrigada A, para o ano agrícola 2013/14, foi de 521,4 mm e alcançou uma produtividade de 13.800 Kg/ha. Em contrapartida foi estimada uma ETc do milho de 396,6 mm na área irrigada C, para o ano

agrícola 2016/17, obtendo-se uma produtividade média de 13.200 Kg/ha. Katerji et al. (2013) realizando estudos com a eficiência do uso da água na cultura do milho alcançaram uma produtividade de 10.000 kg/ha para uma estimativa da ETc de 483 mm. Fan et al. (2017) trabalhando com uso de *mulching* (película plástica) para melhorar a eficiência no uso da água na irrigação do milho, numa região árida do noroeste da China, obtiveram uma ETc de 550 a 575 mm no ano de 2015, alcançando uma produtividade de 6.000 kg/ha. Os valores alcançados na ETc pelos autores citados são próximos aos encontrados neste estudo, porém divergindo nos dados de produtividade. As diferenças encontradas nos valores de produtividade podem ter ocorrido por diversas causas, como: qualidade da semente, densidade de semeadura, adubação, danos causados por doenças, déficit de irrigação, danos causados pelo clima, dentre outros fatores que não são relatados neste estudo.

3.3 NDVI e graus-dia acumulado para a cultura do milho

O NDVI é utilizado para estimar e avaliar a cobertura vegetal, podendo servir de base para diagnosticar o IAF, biomassa, porcentagem de cobertura do solo, atividade fotossintética e estimativa da produtividade. O desenvolvimento da cultura está relacionado ao GDD, pois a duração dos estádios vegetativos está vinculada ao acúmulo térmico acima da temperatura base. Na Tabela 05, são apresentadas as datas onde foram possíveis obter imagens satelitais, os NDVI encontrados, GDD para cada data que se obteve imagens nos diferentes estádios fenológicos.

Os valores do NDVI encontrados para o ano agrícola 2016/17, na área irrigada A, variaram de 0,20 - 0,33 em seu estágio vegetativo inicial, 0,84 - 0,86 no estágio vegetativo intermediário e valores de 0,41 - 0,62 no estágio vegetativo final da cultura do milho. Toureiro et al. (2017) trabalhando com informações de sensoriamento remoto, encontraram valores de NDVI para o milho de 0,18 para o estágio vegetativo inicial, 0,80 para o estágio intermediário e 0,70 para o estágio final de desenvolvimento do milho. Battude et al. (2016) trabalhando com estimativas de biomassa e produtividade da cultura do milho, usando imagens orbitais de alta resolução, encontraram valores de NDVI ini = 0,19, NDVI med = 0,85 e NDVI final = 0,30 para a cultura o milho. Os valores de NDVI obtidos neste estudo são próximos aos encontrados na literatura, que utilizaram imagens orbitais para identificação do índice de vegetação, para os três estádios vegetativos da cultura do milho, relatando uma aproximação da resposta espectral da cultura identificada pelo NDVI em diferentes localizações geográficas.

Tabela 05. Graus dia acumulado (GDD), NDVI mín, NDVI máx e coeficiente de variação (CV) que foram realizados para os valores totais de NDVI para cada área irrigada, nos três ciclos culturais.

Dados de coeficiente de variação do NDVI para os três anos agrícolas nas três áreas irrigadas A, B e C												
Data	Área A				Área B				Área C			
	GDD	NDVI mín	NDVI máx	CV	GDD	NDVI mín	NDVI máx	CV	GDD	NDVI mín	NDVI máx	CV
13/09/13	84	0,21	0,23	2,4	84	0,22	0,24	3,3	55	0,20	0,22	2,7
08/10/13	207	0,23	0,25	2,3	210	0,23	0,26	3,6	138	0,22	0,24	3,2
16/11/13	623	0,83	0,84	0,5	630	0,82	0,83	0,3	608	0,81	0,84	0,9
25/11/13	729	0,82	0,85	0,9	737	0,84	0,84	0,2	717	0,83	0,85	0,6
18/12/13	1029	0,82	0,84	0,5	1028	0,79	0,84	1,5	1022	0,82	0,84	0,5
19/01/14	1499	0,78	0,81	0,9	1502	0,80	0,81	0,5	1531	0,79	0,82	1,1
24/08/14	38	0,25	0,28	3,1	38	0,25	0,30	4,2	32	0,27	0,29	1,8
09/09/14	127	0,24	0,26	2,7	122	0,25	0,29	4,7	124	0,25	0,26	1,1
16/09/14	191	0,25	0,28	3,5	178	0,25	0,30	5,3	190	0,25	0,26	1,1
25/09/14	250	0,26	0,29	4,4	234	0,30	0,35	5,1	251	0,27	0,31	4,2
02/10/14	306	0,34	0,41	5,5	291	0,34	0,39	4,6	309	0,35	0,37	3,8
27/10/14	537	0,67	0,74	3,2	524	0,60	0,72	5,2	545	0,67	0,72	2,1
28/11/14	921	0,78	0,81	1,3	911	0,74	0,81	2,8	937	0,79	0,82	0,9
05/12/14	1013	0,78	0,83	1,7	1004	0,76	0,82	2,3	1031	0,81	0,84	0,9
06/01/15	1407	0,53	0,71	8,3	1401	0,64	0,73	3,9	1432	0,60	0,69	3,9
22/01/15	1645	0,34	0,71	7,9	1636	0,52	0,73	17	1580	0,51	0,69	14
14/09/16	117	0,20	0,33	13	118	0,23	0,26	3,6	117	0,21	0,26	6,8
21/09/16	147	0,24	0,26	2,8	149	0,24	0,26	2,5	148	0,25	0,26	1,3
07/10/16	247	0,35	0,42	4,9	250	0,36	0,40	3,6	250	0,37	0,40	2,6
23/10/16	392	0,61	0,69	3,7	397	0,58	0,65	3,4	399	0,61	0,64	1,7
24/11/16	929	0,84	0,86	0,7	929	0,82	0,86	1,4	849	0,84	0,86	0,5
04/01/17	1468	0,64	0,68	1,7	1472	0,58	0,65	4,4	1398	0,51	0,60	5,1
11/01/17	1560	0,41	0,62	12	1564	0,45	0,55	5,5	1490	0,64	0,83	7,7

Sendo: Data: data da passagem do satélite que obteve-se imagem; GDD: graus-dia acumulado para a cultura até o dia da obtenção da imagem; NDVI mín é o valor mínimo de NDVI encontrado para todo o pivô; NDVI máx. é o valor máximo de NDVI encontrado para todo o pivô; CV é o coeficiente de variação dos valores totais de NDVI para as três áreas irrigadas A, B e C.

Os dados obtidos pelo NDVI e os GDD para a cultura do milho, são informações essenciais que podem ser utilizados para caracterizar cada estágio fenológico da cultura na obtenção de dados qualitativos da planta, que caracterizam seu vigor, demanda hídrica e também estimativa da produtividade. Avaliando o comportamento da área irrigada B no ano agrícola 2013/14 observa-se que a cultura do milho atinge seu estágio médio com GDD de 737 em 25/11/2013. Rocha et al. (2011) obtiveram valores de GDD de 756 até o florescimento do milho, realizando pesquisas com diferentes épocas de semeadura em Arapiraca - Alagoas, Brasil. Paredes et al. (2015) trabalhando com avaliações do uso da água com a cultura do milho (PR 33Y74, ciclo tardio) em Alpiarça Portugal, encontraram GDD de 1.448 em seu estágio médio. As diferenças encontradas para os GDD são compreensíveis devido à distinção inerente às variedades do milho (ciclo precoce e tardio), épocas de semeadura e as condições climáticas da região que influenciam no desenvolvimento da cultura do milho até o florescimento.

Para analisar a dispersão em termos relativos dos valores do NDVI obtidos em cada área irrigada, utilizando o coeficiente de variação (CV), observou-se para a área irrigada A, no ano agrícola 2016/17, o CV de 13% para a data de 14/09/2016 onde a cultura encontrava-se em estágio inicial. Neste caso a cultura estava em fase vegetativa V2, duas folhas expandidas, o que proporciona uma amplitude na identificação dos valores de NDVI devido ao dossel vegetativo da cultura não cobrir a superfície do solo.

Para o ano agrícola 2013/14 os resultados do CV foram inferiores a 4% para as três áreas irrigadas, entretanto para o ano agrícola 2014/15 foi encontrado o valor de 8,3% para o dia 06/01/2015 na área irrigada A, e 14% para a área irrigada C em 22/01/2015. Esses valores encontrados no ano agrícola 2014/15 foram observados devido à senescência da área foliar do milho, onde as plantas se encontravam em estágio final de desenvolvimento, havendo maior diferença nos valores do NDVI devido à variação da refletância espectral da área foliar. A diferença dos valores de NDVI durante a senescência das plantas de milho é resultante da menor refletância da faixa espectral do infravermelho próximo no mesófilo foliar, ocasionando em reduções dos valores do NDVI para toda a área estudada.

3.4 Indicadores estatísticos

Na Tabela 06, são apresentados os resultados dos indicadores estatísticos realizados para a estimativa da ETC NDVI com a estimativa da ETC obtida pelo modelo SIMDualKc, para as três áreas irrigadas nos três anos agrícolas.

Tabela 06. Indicadores de ajustamento relativo para a ETc obtida pelo NDVI com a ETc estimada pelo modelo SIMDualKc, para as três áreas irrigadas no município de Júlio de Castilhos – RS, Brasil nos três anos agrícolas 2013/14, 2014/15 e 2016/17.

Pivô	b_0	R^2	RMSE	PBIAS	AAE	ARE	EF
A	0,95	0,99	0,30	3,6	0,19	4,66	0,98
B	0,96	0,95	0,44	3,8	0,35	12,8	0,95
C	0,93	0,98	0,39	7,2	0,27	7,05	0,96

Sendo: b_0 – coeficiente de regressão; R^2 - coeficiente de determinação; RMSE – raiz quadrada do erro médio; PBIAS – percentual de viés; AAE – erro médio absoluto; ARE - erro médio relativo; EF – eficiência de modelagem.

O b_0 apresentou valores $\geq 0,93$, para as três áreas irrigadas, indicando que os valores estimados pela ETc encontrada pelo NDVI são estatisticamente próximos aos valores estimados pela ETc obtida pelo modelo SIMDualKc. O R^2 foi $\geq 0,95$ para todas as situações avaliadas no presente estudo, demonstrando que maior parte da variância dos valores estimados pelo processamento de imagens orbitais é próxima aos valores encontrados pelo modelo SIMDualKc. A RMSE obtida entre ETc NDVI com a ETc SIMDualKc, para o conjunto de imagens consideradas, apresentou valores inferiores a 0,44 para as três áreas agrícolas. Estes resultados indicam que a variância dos erros residuais foi baixa. O PBIAS indica uma pequena sobre avaliação nos valores encontrados pelo NDVI com valores $\leq 7,2$. O AAE obteve valores $\leq 0,35$ identificando que houveram pequenos erros na estimativa da relação da ETc NDVI com a ETc SIMDualKc. O ARE foi encontrado uma porcentagem $\leq 12,8$ indicando uma proximidade nos resultados de ambas metodologias com pequenos erros. Os valores da EF foram $\geq 0,95$ para este estudo, indicando que a variância dos resíduos obtidos pela ETc NDVI foi menor que a variância dos resíduos simulados pela ETc do modelo SIMDualKc.

Os resultados globais da análise estatística demonstraram um bom ajuste entre a estimativa da ETc NDVI com a ETc SIMDualKc ao longo do ciclo da cultura, para os três anos agrícolas analisados no município de Júlio de Castilhos - RS.

A seguir é apresentada a análise de dispersão dos resultados obtidos pela ETc obtida pelo NDVI com a ETc estimada pelo modelo SIMDualKc, para as três áreas irrigadas A, B e C, respectivamente, nos três anos agrícolas estudados 2013/14, 2014/15 e 2016/17 (Figura 03).

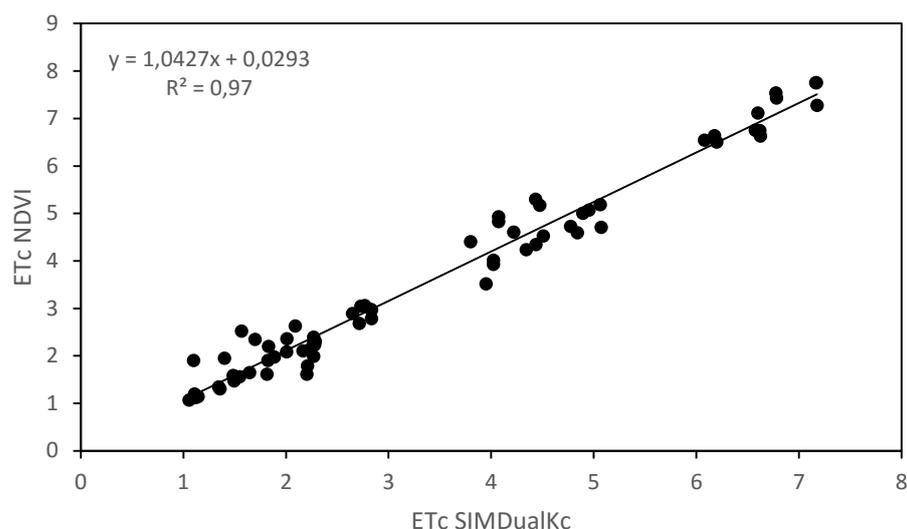


Figura 03. Análise de dispersão dos resultados da ETc obtida pelo NDVI com a ETc estimada pelo modelo SIMDualKc, para as áreas irrigadas A, B e C nos três anos agrícolas 2013/14, 2014/15 e 2016/17.

Os resultados da análise de dispersão entre a estimativa da ETc obtida pelo processamento de imagens satelitais com a ETc estimada pelo modelo SIMDualKc, delineiam a aproximação dos valores estimados pelo NDVI com os valores simulados pelo modelo SIMDualKc, onde obteve-se um coeficiente de determinação de 0,97. Este valor encontrado, para o R^2 , se justifica pelo fato do NDVI ser um parâmetro capaz de identificar as fases de desenvolvimento da cultura, ocorrência de algum estresse, como também se relaciona com parâmetros biofísicos das plantas, incluindo o IAF, atividade fotossintética, estimativa da produtividade, e a própria ETc. Campos et al. (2017) trabalhando com estimativas da ETc para as culturas do milho, com dados de sensoriamento remoto, encontraram um R^2 de 0,85 para a relação ETc simulada com a ETc observada para a cultura do milho, utilizando dados de IV. Glenn et al. (2011) realizando pesquisas para estimar a ETc por sensoriamento remoto, encontraram um R^2 de 0,97 para a relação de ETc IV com ETc medida em lisímetros, para a cultura do trigo cultivado em Maricopa, Arizona.

Del Grosso et al. (2018) realizando pesquisas para estimar a evapotranspiração real em áreas semiáridas usando NDVI, encontraram um R^2 de 0,96 para ETc simulada pelo sensor MODIS com a ETc observada, agregada aos períodos de tempo mensal. Identifica-se, desta maneira, a sensibilidade dos valores encontrados pelo NDVI para encontrar os parâmetros da irrigação na estimativa demanda evapotranspirativa da cultura, mesmo em regiões com características de clima adversas, como em áreas semiáridas, onde foi possível encontrar um valor do R^2 próximo ao valor obtido neste estudo.

4 CONCLUSÕES

Com o modelo SIMDualKc foi possível estimar os coeficientes de cultivo como o Kc, Kcb, Ke, os quais possibilitaram a determinação da ETc para os três ciclos culturais, a partir de dados calibrados, de campo e climáticos.

A produtividade da água resultou em valores harmônicos com a literatura para o uso da água na produção do milho irrigado, nas condições do sul do Brasil.

A utilização de dados do sensoriamento remoto para estimar os coeficientes de cultivo do milho foi adequada, devido à obtenção de imagens de boa qualidade para os três estádios principais da cultura (inicial, intermediário e final), onde foi possível calcular a ETc pelo NDVI nos três ciclos culturais analisados.

A ETc do milho obtida com dados do sensoriamento remoto pode ser utilizada para calcular a lâmina de irrigação, visto que utiliza índice de vegetação local, auxiliando no suporte a gestão da irrigação em sistemas agrícolas no sul do Brasil, onde dependem de avaliações periódicas a campo somadas aos dados climáticos para caracterizar a demanda evapotranspirativa da cultura. Utilizando esta metodologia, os produtores podem melhorar a estimativa da demanda de água nas lavouras e conservar a água da irrigação.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper 56**; FAO: Rome, Italy, (1998), 300 p.
2. ALLEN, R. G.; ASCE M.; PEREIRA, L. S.; ASCE, M.; SMITH, M.N; RAES, D.; ASCE, W. J.L. M. FAO-56 Dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, (2005^a), p. 2-13.
3. ALLEN, R. G., ASCE, M.; CLEMMENS, A. J., ASCE, M.; BURT, C. M., ASCE, M.; Solomon, K., ASCE, M.; and O'Halloran, T. Prediction accuracy for project wide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering, American Society of Civil Engineers**, 131, (2005^b), p. 24-36.
4. ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. **Irrig. Sci.**, (2009), p.17-34.
5. BASTIAANSEN, W. G. M.; CHEEMA, M. J. M.; IMMERZEEL, W. W.; MILTENBURG, I. J. AND PELGRUM, H. Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLOOK model. *Water Resources Research* 48(11):W11512, (2012).

6. BATTUDE, M., BITAR, A. A., MORIN, D., CROS, J., HUC, M., SICRE, C. M., DANTEC, V. L., DEMAREZ, V. Estimating maize biomass and yield over large areas using high spatial and temporal resolution Sentinel-2 like remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, 184 (2016), p. 668–681.
7. CALERA, A.; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J.; MELIA, J. Monitoring barley and corn growth from remote sensing data at field scale. *Int. J. Remote Sens.* 25, (2004), p. 97–109.
8. CALERA, A.; CAMPOS, I.; OSANN, A.; D'URSO, G.; MENENTE M. Remote Sensing for Crop Water Management: From ET Modeling to Services for the End Users. **Sensors** (2017), 17, 1104.
9. CAMPOS, I.; NEALE, C. M. U.; SUYKER, A. E.; ARKEBAUER, T. J.; GOLÇALVES, I. Z.; Reflectance-based crop coefficients REDUX: For operational evapotranspiration estimates in the age of high producing hybrid varieties. *Agricultural Water Management*, Volume 187, June (2017), p 140-153.
10. CHAVEZ, P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment** 24(3): (1988), p. 459-479.
11. CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v. 4 Safra 2016/17 - Sexto levantamento, Brasília, (2017), p. 1-176.
12. CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de grãos, v. 7 Safra 2017/18 - Sétimo levantamento, Brasília, (2018), p. 1-139.
13. DAS, T.K.; SAHARAWA, T .S.; BHATTACHARYYA, R.; SUDHISHRI S.; BANDYOPADHYAY, K. K.; , SHARMA, A. R.; JAT, M. L. Conservation agriculture effects on crop and water productivity, profitability and soil organic carbon accumulation under a maize-wheat cropping system in the North-western Indo-Gangetic Plains. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2017.10.021>. **Field Crops Research** 215 (2018), p. 222–231.
14. EISENHAUER, J.G. Regression through the origin. *Teach Stat* 25, (2003), p. 76–80.
15. FACCHI, A.; GHARSALLAH, O.; GANDOLFI, C. Evapotranspiration models for a maize agro-ecosystem in irrigated and rainfed conditions. **Journal of Agricultural Engineering** (2013); volume XLIV(s2): e 169.
16. FAN, Y.; DING, R.; KANG, S., HAO, X.; DU, T.; TONG, L.; LI, S. Plastic mulch decreases available energy and evapotranspiration and improves yield and water use efficiency in an irrigated maize cropland. **Agricultural Water Management** 179 (2017), p. 122–131.
17. FARAHANI HJ, HOWELL TA, SHUTTLEWORTH WJ, BAUSCH WC. Evapotranspiration: process in measurement and modeling in agriculture. *American society of agricultural and biological engineers* 50(5), (2007), 1627–1638.
18. GILMORE, E.C.; ROGERS, J.S. Heat units as a method of measuring maturity in corn. *Agronomy Journal*, v.50, n.10, (1958), p.611-615.

19. GIMÉNEZ, L., PETILLO, M. G., PAREDES, P., AND PEREIRA, L. S. Predicting Maize Transpiration, Water Use and Productivity for Developing Improved Supplemental Irrigation Schedules in Western Uruguay to Cope with Climate Variability. **Water** (2016), 8, 309; doi:10.3390/w8070309.
20. 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, p. 4050–4062.
21. DEL GROSSO, S.J., PARTON, W.J., DERNER, J.D., CHEN, M., TUCKER, C.J Simple models to predict grassland ecosystem C exchange and actual evapotranspiration using NDVI and environmental variables Agricultural and Forest Meteorology, Volume 249, Issue undefined, 15 February (2018).
22. KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorol. Z.** (2006), 15, p. 259–263.
23. KAMBLE, B.; IRMAK, A.; HUBBARD, K. Estimating Crop Coefficients Using Remote Sensing-Based Vegetation Index. **Remote Sensing**, (2013), p.1588-1602.
24. KATERJI, N.; CAMPI, P.; MASTRORILLI, M. Productivity, evapotranspiration, and water use efficiency of corn and tomato crops simulated by AquaCrop under contrasting water stress conditions in the Mediterranean region. **Agricultural Water Management** 130 (2013), p. 14–26.
25. KUINCHTNER, A.; BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. *Disciplinarium Scientia*, Santa Maria, V. 2, nr. 1, (2001), p. 171-182.
26. LI, J.; FENG, L.; PANG, X.; GONG, W.; ZHAO, X. Radiometric cross Calibration of Gaofen-1 WFV Cameras Using Landsat-8 OLI Images: A Simple Image-Based Method. **Remote Sensing**. (2016), 8, 411.
27. LIU, Y.; PEREIRA, L.S.; FERNANDO, R.M. Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: Parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation. **Agric. Water Manag.** (2006), 84, p. 27–40.
28. MADUGUNDU, R.; AL-GAADI, K.; TOLA, E.; KAYAD, A. G.; JHA, C. S. Estimation of gross primary production of irrigated maize using Landsat-8 imagery and Eddy Covariance data. **Saudi Journal of Biological Sciences** (2017) 24, p. 410–420.
29. MARTINS, J. D. RODRIGUES, G. C.; PAREDES, P.; CARLESSO, R.; OLIVEIRA, Z. B.; KNIES, A. E.; PETRY, M. T.; PEREIRA, L. S. Dual crop coefficients for maize in southern Brazil: Model testing for sprinkler and drip irrigation and mulched soil. **Biosystems Engineering**, 115, (2013), p. 291-310.
30. MATEOS, L., GONZÁLEZ-DUGO, M. P., TESTI, L., VILLALOBOS, F. J. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images .I. Method. **Agriculture Water Management**, (2013), p. 81-91.

31. MIAO, Q., ROSA, R. D., SHI, H., PAREDES, P., ZHUA, L., DAI, J., GONCALVES, J. M., PEREIRA, L. S. Modeling water use, transpiration and soil evaporation of spring wheat–maize and spring wheat–sunflower relay intercropping using the dual crop coefficient approach. **Agricultural Water Management**, 165, (2016), p. 211-229.
32. MICHELON, C. J., CARLESSO, R., OLIVEIRA, Z. B., KNIES, A. E., PETRY, M. T., & MARTINS, J. D. Funções de pedotransferência para estimativa da retenção de água em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, 40, (2010), p. 848 - 853.
33. MORIASI, D.N., ARNOLD, J.G., VAN LIEW, M.W., BINGNER, R.L., HARMEL, R.D., VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Trans. **ASABE** 50 (3), (2007), p. 885–900.
34. PAREDES, P., Rodrigues G.C., Alves I., Pereira L.S. Partitioning evapotranspiration, yield prediction and economic returns of maize under various irrigation management strategies. **Agriculture Water Management**, (2014), p. 27-39.
35. PAREDES, P., RODRIGUES, G. C., ALVES, I., CAMEIRA, M. R., ABREU, J. P. M., TORRES, M. O., PEREIRA, L. S. Calendários de rega para condições de seca e sua avaliação pela produtividade da água. Aplicação a cevada e milho, 2015: <https://www.researchgate.net/publication/287968171>.
36. PEÑA, M. AND BRENNING, A. Assessing fruit-tree crop classification from Landsat-8 time series for the Maipo Valley, Chile **Remote Sens. Environ.**, 171 (2015), p. 234-244.
37. PEREIRA, L. S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Management**. 108, (2012), p. 39– 51
38. PEREIRA, L. S., PAREDES, P., RODRIGUES, G. C., NEVES, M. Modeling malt barley water use and evapotranspiration partitioning in two contrasting rainfall years. Assessing AquaCrop and SIMDualKc models. **Agriculture Water Management**, (2015), p. 239-254.
39. PÔÇAS, I., PAÇO T.A., PAREDES, P., CUNHA, M., PEREIRA, L.S. Estimation of Actual Crop Coefficients Using Remotely Sensed Vegetation Indices and Soil Water Balance Modelled Data. **Remote Sensing**, (2015), p. 1-29.
40. RICHARDS, L.A. Methods of measuring moisture tension. *Soil science*, v.58, (1949) p.95-112.
41. RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. How a corn plant develops. *Special Bulletin, Iowa*, n. 48. (1993).
42. ROY, D.P., WULDER, M., LOVELAND, T., WOODCOCK, C., ALLEN, R., ANDERSON, M., KENNEDY, R. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research **Remote Sens. Environ.**, 145 (2014), p. 154-172
43. ROCHA, A. E. Q.; LYRA, G. B.; MEDEIROS, R. P.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; FERREIRA JÚNIOR, R. A.; SILVA, M. B.P.; BRITO, K. S. Fenologia do milho em função

- dos graus-dia acumulados em quatro épocas de plantio na região de Arapiraca-AL. XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. (2011), p. 18 - 21.
44. ROSA, R. D., PAREDES, P., RODRIGUES, G. C., ALVES, I. , FERNANDO, R. M., PEREIRA, L. S., ALLEN, R. G. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software. 1. Background Comput. **Strat**, (2012), p. 1204 -1213.
 45. RODRIGUES, G. C.; PEREIRA, L. S. Assessing economic impacts of deficit irrigation as related to water productivity and water costs. **Biosystems Engineering**, Volume 103, Issue 4, (2009), p. 536-551.
 46. RODRIGUES, G.C., MARTINS, J.D., DA SILVA, F.G., CARLESSO, R., PEREIRA, L.S. Modelling economic impacts of deficit irrigated maize in Brazil with consideration of different rainfall regimes. *Biosyst. Eng.* 116, (2013), p. 97–110.
 47. ROUSE, J. W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A., DEERING, D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. **Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium**. Greenbelt: NASA. (1974).
 48. STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D. et al. Solos do Rio Grande do Sul. 2.ed. Porto Alegre: **EMATER/RS**, UFRGS, (2008), 222p.
 49. TEIXEIRA, A. H. DE C. HERNANDEZ, F. B. T. ANDRADE, R. G. LEIVAS, J. F. VICTORIA, D. DE C. BOLFE, E. L. Irrigation Performance Assessments for Corn Crop With Landsat Images in the São Paulo State, Brazil. <http://dx.doi.org/10.12702/ii.inovagri.2014-a099>.
 50. TOUREIRO, C.; SERRALHEIRO, R.; SHAHIDIAN, S.; SOUSA, A. Irrigation management with remote sensing: Evaluating irrigation requirement for maize under Mediterranean climate condition. **Agricultural Water Management** 184 (2017), p. 211–220.
 51. WANG, J., WANG, J.L., ZHAO, C.X., MCGIFFEN, M.E., LIU, J.B., WANG, G.D. Assessing the performance of two models on calculating maize actual evapotranspiration in a semi-humid and drought-prone region of China. (2017), DOI 10.1007/s00704-016-2032-2.
 52. WEI, Z., PAREDES, P., LIU, Y., CHI, W. W., PEREIRA, L. S. Modelling transpiration, soil evaporation and yield prediction of soybean in North China Plain. *Agric. Water Manage.* (2014).

DISCUSSÃO GERAL

O estudo analisou a aplicação do NDVI no monitoramento de áreas irrigadas por pivô central com ênfase na estimativa do Kcb e ETc. Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica da utilização de dados de campo, modelos de balanço hídrico e a partir do sensoriamento remoto para a estimativa dos parâmetros de irrigação, abordando as metodologias que vem sendo utilizadas e aplicadas em caráter científico e operacional visando o apoio ao manejo da irrigação. Sua importância vem de encontro ao planejamento da irrigação em áreas agrícolas, gestão dos recursos hídricos e possibilidade de se obter uma estimativa mais próxima da realidade em termos do uso da água pelas culturas. Essas informações implementadas em modelos de balanço hídrico do solo como SIMDualKc podem prover estimativas dos coeficientes de cultivo e da evapotranspiração em condições locais. Sendo possível obter dados de uma forma espacializada, visto que foi utilizado imagens de satélite, o qual possuem informações específicas em cada pixel para obtenção dos parâmetros de irrigação. O uso de imagens satelitais possibilita a percepção dos padrões de variabilidade espaço temporal dos parâmetros estimados, sendo fundamental quando a região sob avaliação é heterogênea nos aspectos das plantas, do solo e do clima. Os dados provenientes do sensoriamento remoto são capazes de melhorar e adequar o manejo da irrigação, além de serem agrupados e organizados em banco de dados geográficos que permitem uma visualização das áreas de maior interesse agrícola. O Artigo I teve como objetivo estimar os Kcb do milho, a partir do processamento de imagens do Sensor OLI, plataforma Landsat 8, e pelo modelo de balanço hídrico do solo SIMDualKc. Com o modelo SIMDualKc também foram estimados os componentes do balanço hídrico do solo, separando a ETc em evaporação da água na superfície do solo e transpiração da cultura, avaliando a relevância de cada parâmetro estimado com dados de campo e dados meteorológicos, em três áreas irrigadas por pivô central. Os resultados obtidos pela relação do Kcb NDVI com dados de Kcb SIMDualKc, para o R^2 , obtiveram um valor de 97% nos três anos agrícolas avaliados. Este resultado mostra-se promissor para o apoio ao manejo da irrigação com a utilização de dados provindos do índice de vegetação, que fornecem informações locais no período desejado para o ciclo da cultura, cujos dados podem ser assimilados em modelos de balanço hídrico do solo. O modelo utilizado, SIMDualKc, forneceu dados do Kcb que foram correlacionados com o Kcb NDVI, obtendo um bom ajuste entre os valores de Kcb no comportamento da cultura nos três ciclos culturais analisados. Os resultados globais obtidos mostraram um bom desempenho para a aproximação do Kcb a partir do NDVI nas três áreas irrigadas por pivô central. O erro relativo médio estimado entre o Kcb obtido pelo NDVI e o

K_{cb} do modelo $SIMDualK_c$, foi menor que 10%, indicando um bom ajuste na aproximação ao K_{cb} . Os valores do K_{cb} obtidos por sensoriamento remoto tem potencial para estar bem ajustados com a real demanda transpirativa da cultura, devido ao ajuste da planta com dados provindos pelo NDVI. O Artigo II teve como objetivos: estimar a demanda evapotranspirativa da cultura do milho por meio dos coeficientes de cultivo, obtida pelo processamento das imagens do Sensor OLI e a partir do modelo $SIMDualK_c$, com dados de três áreas irrigadas em três ciclos culturais; também foi avaliada a produtividade da água considerando o uso total da água e o uso da água advinda apenas da irrigação, com vistas a dar suporte complementar ao manejo da irrigação local. Foram apresentadas informações referentes ao uso do solo, tipo de cultura, estágio fenológico, dados climáticos, evapotranspiração, análise estatística dos valores encontrados do NDVI para cada área irrigada, dentre outros. As informações obtidas pelo processamento das imagens satelitais, integradas no SAGA GIS, possibilitaram identificar os três estádios fenológicos durante cada ciclo cultural, bem como os valores de NDVI, K_{cb} , K_c e ET_c . Há evidências que o banco de dados criado pelo SAGA GIS pode ser uma ferramenta que dê suporte ao gerenciamento e monitoramento da irrigação, facilitando a tomada de decisão devido à possibilidade da obtenção de informações dos coeficientes de cultivo para cada estágio fenológico da cultura do milho de forma espacializada, durante cada ciclo cultural. Desta forma, propôs-se uma metodologia para obter estimativas do K_{cb} e ET_c mais próximas à realidade do solo e clima para a cultura do milho estabelecidas na região estudada. A utilização de três áreas irrigadas com diferentes especificidades e cobrindo três anos agrícolas, confere bons resultados, considerando que a estimativa do K_{cb} e K_c , por meio de NDVI e pelo modelo $SIMDualK_c$, vêm representar uma ferramenta útil na determinação das necessidades hídricas das culturas, em pivôs de irrigação no sul do Brasil, visando apoiar o planejamento e gerenciamento da irrigação. Também pode servir para aprimorar e adequar o uso da água na gestão de comitês de bacias hidrográficas, com vistas ao uso racional da água utilizada para irrigação.

CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho resultou em algumas conclusões com respeito ao uso da água em sistemas produtivos irrigados que utilizou dados de campo, dados climatológicos e dados obtidos por sensoriamento remoto. A relação dos dados de Kcb NDVI e ETc NDVI, observados por sensoriamento remoto, com os dados de Kcb e ETc estimados a partir do modelo SIMDualKc, mostraram um bom desempenho para a aproximação do R², b₀, AAE, ARE e EF para os três anos agrícolas. Resultando em uma metodologia que encontrou estimativas dos parâmetros de irrigação próximas à realidade local.

Os valores do NDVI encontrados neste estudo foram: estágio inicial = 0,20 - 0,33; estágio intermediário = 0,60 - 0,86; e para o estágio final = 0,34 - 0,73 para as três áreas irrigadas. Os valores de NDVI alcançados para este estudo são afins aos encontrados na literatura referida, que utilizaram dados de sensoriamento remoto, para obter dados de índice de vegetação para a cultura do milho.

O comportamento dos valores do Kcb e do Kc observados pelos NDVI alcançaram resultados satisfatórios comparados com os dados simulados pelo modelo SIMDualKc e aos encontrados na literatura citada, que poderá servir para realizar melhorias em metodologias que utilizam imagens orbitais, além de contribuir na gestão do uso da água para agricultores, pesquisadores e órgãos gestores de recursos hídricos na região estudada.

Conclui-se que as metodologias utilizadas neste estudo são adequadas para a estimativa do Kcb, do Kc e da ETc obtidos pelo modelo SIMDualKc e pelo processamento de imagens satelitais na região do estudo, em situações onde o estresse hídrico foi ponderado com valor nulo, considerando que foi possível obter dados climáticos, observações a campo e imagens orbitais para os três anos agrícolas observados.

BIBLIOGRAFIA

1. ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SIMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, (1998) (**Irrigation and Drainage Paper 56**).
2. ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, (2007^a), p. 380-394.
3. ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J.L.; BASTIAANSSEN, W.; KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C.W. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Applications. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, (2007^b), p. 395-406,.
4. BASTIAANSSEN, W.G.M.; NOORDMAN, E.J.M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; ALLEN, R.G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 1, (2005), p. 85-93.
5. DROOGERS, P.; IMMERZEEL, W.W.; LORITE, I.J. Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations. **Agricultural Water management**, v. 97, (2010), p. 1351-1359.
6. ER-RAKI, S. RODRIGUEZ, J.C., GARATUZA-PAYAN, J., WATTS, C.J., CHEHBOUNI, A. Determination of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid region of Northwest Mexico using multispectral vegetation index. **Agriculture Water Management**, (2013), p. 12-19.
7. 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**, v.96, (2009), p.1398-1408.
8. FOOLAD, F.; FRANZ, T. E.; WANG, T.; GIBSON, J.; KILIC, A.; ALLEN, R. G., and SUYKER, A. Feasibility analysis of using inverse modeling for estimating field-scale evapotranspiration in maize and soybean fields from soil water content monitoring networks. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 21, (2017), p. 1263–1277.
9. KAMBLE, B.; IRMAK, A.; HUBBARD, K. Estimating Crop Coefficients Using Remote Sensing-Based Vegetation Index. **Remote Sensing**, (2013), p. 1588-1602.
10. LI, Y.; HUANGA, C.; HOUA, J.; GUD, J.; ZHUD, G., LI, X. Mapping daily evapotranspiration based on spatiotemporal fusion of ASTER and MODIS images over irrigated agricultural areas in the Heihe River Basin, Northwest China. **Agricultural and Forest Meteorology** v. 244–245, (2017), p. 82–97.

11. ODHIAMBO, L. O., & IRMAK, S. Evaluation of the impact of surface cover on single and dual crop coefficient for estimating soybean actual evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, 104, (2012), p.221 - 234.
12. PEREIRA, L.S. Necessidades de Água e Métodos de Rega. Publ. Europa-América, Lisboa, (2004), 313 p.
13. PEREIRA, L. S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Management**. 108, (2012), p. 39– 51
14. PEREIRA, L. S, ALLEN, R. G, SMITH, M., RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: past and future. **Agricultural Water Management** 147, (2015), p. 4–20.
15. POPOVA, Z., & PEREIRA, L. S. Modeling for maize irrigation scheduling using long term experimental data from Plovdiv region, Bulgaria. **Agricultural Water Management**, 98, (2011), p. 675 - 683.
16. ROSA, R.D., PAREDES, P., Rodrigues, G.C., ALVES, I., FERNANDO, R.M., PEREIRA, L.S., ALLEN, R.G. Implementing the dual crop coefficient approach in interactive software.1. Background and computational strategy. **Agricultural Water Management**. 103, (2012), p. 8-24.