

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE
CAMPUS CASCAVEL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

**PADRÃO ESPECTRO-TEMPORAL DA CULTURA DO CRAMBE (*Crambe abyssinica*
Hochst) E ESTIMATIVA DE RENDIMENTO DE GRÃOS POR SENSORES TERRESTRES**

OCTAVIO HENRIQUE VIANA

CASCAVEL – Paraná – Brasil

2017

OCTAVIO HENRIQUE VIANA

**PADRÃO ESPECTRO-TEMPORAL DA CULTURA DO CRAMBE (*Crambe abyssinica*
Hochst) E ESTIMATIVA DE RENDIMENTO DE GRÃOS POR SENSORES TERRESTRES**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Sistemas Agroindustriais, linha de pesquisa: Geoprocessamento, Estatística Espacial e Agricultura de Precisão.

Orientador: Dr. Erivelto Mercante

CASCADEL – Paraná – Brasil

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Sistema de Bibliotecas – UNIOESTE – Campus Cascavel)

V668p	<p>Viana, Octavio Henrique. Padrão espectro-temporal da cultura do crambe (<i>Crambe abyssinica</i> Hochst) e estimativa de rendimento de grãos por sensores terrestres / Octavio Henrique Viana. --- Cascavel (PR), 2017. 76 f.:il.</p> <p>Orientador: Dr. Erivelto Mercante</p> <p>Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2017. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Sistemas Agroindustriais. Inclui Bibliografia</p> <p>1. Sensoriamento Remoto. 2. Agricultura – Estimativa de rendimento. 3. Plantas oleaginosas. I. Mercante, Erivelto. II. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 633.85</p>
-------	--

Rosângela A. A. Silva – CRB 9ª/1810

*Revisão de Normas, Português e Inglês, pela Prof. Dhandara Soares de Lima Capitani, 19 de janeiro de 2018.

OCTAVIO HENRIQUE VIANA

Padrão Espectro-Temporal da Cultura do Crambe (*Crambe Abyssinica* Hochst) e estimativa de rendimento de grãos por sensores terrestres

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração Sistemas Biológicos e Agroindustriais, linha de pesquisa Geoprocessamento, Estatística Espacial e Agricultura de Precisão, APROVADO(A) pela seguinte banca examinadora:


Orientador(a) - Erivelto Mercante

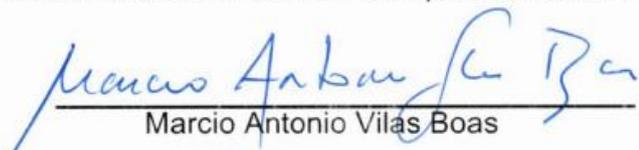
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)


Renato Cassol de Oliveira

Faculdade Assis Gurgacz (FAG)


Maurício Guy de Andrade

Universidade Federal do Paraná - Campus de Palotina (UFPR)


Marcio Antonio Vilas Boas

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)


Maritane Prior

Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 12 de dezembro de 2017

BIOGRAFIA RESUMIDA

Octavio Henrique Viana, nascido aos 14 dias do mês de Julho de 1988, em Cascavel, PR, graduado em Agronomia (2009) e especialista em Auditoria, Perícia e Gestão Ambiental (2011) pelo Centro Universitário FAG. Em 2013, obteve título de mestre em Energia na Agricultura, pelo Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia de Energia na Agricultura – PPGEA da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, *Campus* Cascavel. Em 2014 ingressou no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Agrícola (PGEAGRI), nível Doutorado, na área de concentração de Sistema Biológicos e Agroindustriais – SBA, linha de pesquisa em Geoprocessamento, Estatística Espacial e Agricultura de Precisão, orientado pelo professor Dr. Erivelto Mercante. Foi docente nos colegiados de Agronomia e de Engenharia Civil do Centro Universitário Fundação Assis Gurgacz – FAG de 2010 a 2015, assim como pesquisador no projeto P&D "Avaliação do desempenho de óleo vegetal de Crambe como fluído isolante em transformadores de distribuição e potência" (2012 – 2015). Desde 2015 atua como Professor do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico no Instituto Federal Catarinense – IFC, *Campus* Santa Rosa do Sul.

DEDICATÓRIA

À minha esposa, **Priscila**, e a nossa filha **Cecília**, com todo meu amor.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde e proteção;

À toda minha família, meus pais, Fernando Huascar Viana e Tânia Carmen Tozo Viana, e à irmã Fernanda Tozo Viana, que sempre me apoiaram, à minha esposa Priscila Candido Moraes Viana, por todo o seu empenho, companheirismo e amor, que foram primordiais durante esta fase da minha vida, e para minha filha, Cecília Moraes Viana, que enche meus dias de alegria ao abrir um sorriso;

Ao meu orientador, Professor Dr. Erivelto Mercante, por todo apoio, ensinamento e compreensão das mudanças ocorridas durante estes anos de estudo e pesquisa;

À Companhia Paranaense de Energia (COPEL) pelo apoio financeiro por meio do projeto P&D "Avaliação do desempenho de óleo vegetal de Crambe como fluido isolante em transformadores de distribuição e potência", que possibilitou a implantação do experimento. Em especial, para toda a equipe de pesquisadores que auxiliaram no desenvolvimento deste estudo;

Ao Centro Universitário FAG, que disponibilizou o local de implantação do experimento, em especial ao meu amigo e colega de profissão Helmuth Guilherme Bleil Junior; agradeço também à instituição, pela formação que tive na graduação, na especialização e pelos primeiros passos na carreira de docente do ensino superior. Ao meu orientado Filipe Fontes Bombarda, que auxiliou na coleta de dados;

À Equipe do Laboratório de Topografia e Geoprocessamento (GEOLAB) da UNIOESTE, que auxiliou em todas as etapas da pesquisa, em especial aos colegas Douglas Kusminski, Henrique Felipetto, Carlos Eduardo Cattani, Lucas Oldoni, Vitor Prudente e Murilo Garcia;

Aos membros da Banca avaliadora pela disponibilidade, a dedicação e as contribuições visando o aprimoramento da pesquisa. Em especial, ao professor Dr. Maurício Guy de Andrade, pela amizade e o auxílio na elaboração da tese de doutorado; ao professor Dr. Renato Cassol de Oliveira, pela amizade e os ensinamentos desde a graduação em Agronomia.

Ao Instituto Federal Catarinense (IFC) por disponibilizar meu afastamento integral para atividades de doutorado, período de extrema importância para conclusão das minhas atividades;

À UNIOESTE, pela formação no mestrado em Energia na Agricultura e no doutorado em Engenharia Agrícola, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola;

A todos os professores que em algum momento da minha vida, tiveram a disponibilidade e a competência em repassar seus conhecimentos, guiar na formação do meu caráter e que, assim, possibilitaram meu crescimento profissional.

PADRÃO ESPECTRO-TEMPORAL DA CULTURA DO CRAMBE (*Crambe abyssinica* Hochst) E ESTIMATIVA DE RENDIMENTO DE GRÃOS POR SENSORES TERRESTRES

RESUMO GERAL

O crambe é uma cultura anual, com alto teor de óleo nas sementes. Cultivada no inverno, apresenta ciclo curto e baixo custo de implantação. O óleo extraído é empregado na produção de lubrificantes industriais, biocombustíveis e fluidos isolantes elétricos. No Brasil, diversas pesquisas vem sendo realizadas visando principalmente experimentos que avaliam o rendimento de grãos em diversas regiões. Contudo, dados relacionados ao comportamento espectro-temporal do crambe durante as fases de desenvolvimento são inexistentes. O conhecimento destes dados possibilita o monitoramento da cultura por técnicas de sensoriamento remoto, que subsidiam órgãos oficiais na estimativa de safras de grãos do país. Neste contexto, o presente estudo tem por objetivos (i) caracterizar o padrão espectro-temporal do crambe obtido por sensores terrestres, no município de Cascavel, Paraná; e (ii) avaliar a relação entre faixas espectrais e índices de vegetação, obtidos em diferentes estágios fenológicos por sensores espectrais terrestres, com o rendimento de grãos da cultura do crambe. O experimento foi implantado em Cascavel, PR nas safras de inverno de 2014 e 2015. Nos dois anos foram coletadas informações hiperespectrais com o sensor terrestre FieldSpec® 4 Hi-Res (FS4) durante as fases fenológicas de desenvolvimento do crambe, gerados padrão espectro-temporal e perfil temporal dos índices de vegetação por diferença normalizada (NDVI) e ajustado ao solo (SAVI). As médias diárias dos perfis temporais foram submetidas à análise exploratória dos dados. Em 2015, foram coletadas informações espectrais com sensores terrestres ativo e passivo (FS4 e Greenseeker® 505 Handheld) durante todas as fases fenológicas da planta. Separadas nas faixas espectrais do vermelho, infravermelho próximo e médio e gerados os índices NDVI, SAVI e o índice de umidade de diferença normalizada (NDMI). Na fase de maturação foram coletadas plantas para determinar o rendimento de grãos. Foram elaborados e avaliados modelos de regressões lineares entre dados espectrais e rendimento da cultura. Durante as fases de plântula e início do crescimento vegetativo, a banda espectral do vermelho apresentou maiores reflectâncias devido ao solo presente na área sensoriada. Nas fases de crescimento vegetativo e início da floração ocorreram as maiores reflectâncias no infravermelho próximo (IVP), comportamento relacionado à biomassa verde do dossel. Fases de granação e maturação foram caracterizadas pela redução na reflectância no IVP e infravermelho médio (IVM), devido a senescência de folhas e perda de conteúdo de água celular. Os perfis temporais de NDVI e SAVI demonstram crescimento linear até o pico vegetativo do crambe, caracterizado entre o fim da fase fenológica do crescimento vegetativo e o início da floração. O modelo gerado em 2015 pelo NDMI em 66 dias após a semeadura (DAS), no início da floração, apresentou correlação negativa com rendimento de grãos (R^2_{adj} : 0,49; RMSE: 134,80 kg ha⁻¹). A faixa espectral do vermelho (648 a 672 nm) em 66 DAS apresentou correlação linear positiva com rendimento de grãos (R^2_{adj} : 0,36; RMSE: 151,38 kg ha⁻¹). As flores presentes no dossel da planta, na fase de floração, contribuíram para o aumento da reflectância na faixa espectral do vermelho e infravermelho. Os dados de sensores terrestres possibilitaram a caracterização espectro-temporal da cultura do crambe, gerando subsídio para delimitação das áreas cultivadas com a cultura por sensores orbitais. Excesso de precipitação e ventos nas fases de floração, granação e maturação durante a safra de 2015 contribuíram para a variabilidade no rendimento de grãos, reduzindo a capacidade explicativa da produção com os modelos.

Palavras-chave: cultura energética; sensoriamento remoto; perfil espectro-temporal; monitoramento agrícola; estimativa de produção.

SPECTRAL-TEMPORAL CRAMBE CROP BEHAVIOR (*Crambe abyssinica* Hochst) AND GRAIN YIELD ESTIMATION BY TERRESTRIAL SENSORS

ABSTRACT

Crambe is an annual crop with high oil content in the seeds. Cultivated in winter, it presents a short cycle and low implantation cost. The extracted oil is used in the production of industrial lubricants, biofuels and electrical insulating fluids. In Brazil, several researches have been carried out mainly choosing experiments that evaluate grain yield in different regions. However, data related to the spectral-temporal behavior of the crambe during the developmental phases are non-existent. The knowledge of these data enables the monitoring of the crop by remote sensing techniques, which subsidize official organisms in the estimation of grain crops of the country. In this context, the present study aims to (i) characterize the spectral-temporal pattern of crambe obtained by terrestrial sensors in the city of Cascavel, state of Paraná; and (ii) to evaluate the relationship between spectral bands and vegetation indices obtained in different stages phenological measurements by terrestrial spectral sensors, with the grain yield of the crambe crop. The experiment was carried out in Cascavel, PR in the winter crops of 2014 and 2015. During these two years hyperspectral information was collected with the FieldSpec® 4 Hi-Res (FS4) terrestrial sensor through the phenological phases of crambe development, generating spectral-temporal and temporal profile of vegetation indexes by normalized difference (NDVI) and adjusted to soil (SAVI). The daily averages of the temporal profiles were submitted to the exploratory analysis of the data. In 2015, spectral information was collected with active and passive ground sensors (FS4 and Greenseeker® 505 Handheld) during all phenological phases of the plant. Separated in spectral bands of red, near and medium infrared and generated indices NDVI, SAVI, and the Normalized Difference Moisture Index (NDMI). At the maturation stage, plants were collected to determine grain yield. Linear regression models between spectral data and crop yield were elaborated and evaluated. During the seedling and vegetative growth phases the spectral band of red showed higher reflectances, due to the soil present in the sensed area. In the vegetative growth and early flowering phases, the highest reflectance in the near infrared (NIR) occurred, related to the green biomass of the canopy. Phases of granulation and maturation were characterized by the reduction in reflectance in the IVP and medium infrared (SWIR), due to leaf senescence and loss of cellular water content. The temporal profiles of NDVI and SAVI demonstrate linear growth up to the vegetative peak of the crambe, characterized between the end of the phenological phase of the vegetative growth and the beginning of the flowering. The model generated by NDMI in 66 days after sowing (DAS), at the beginning of flowering, showed a negative correlation with grain yield (R^2_{adj} : 0,49; RMSE: 134,80 kg ha⁻¹). The spectral range of red (648 to 672 nm) in 66 DAS presented positive linear correlation with grain yield (R^2_{adj} : 0.36; RMSE: 151.38 kg ha⁻¹). The flowers present in the canopy of the plant, in the flowering phase, contributed to the increase of reflectance in the spectral range of red and infrared. The data of terrestrial sensors enabled the spectral-temporal characterization of the crambe crop, generating subsidy for the delimitation of the cultivated areas with the culture by orbital sensors. Excessive precipitation and wind during the flowering, granulation, and maturation phases during the 2015 harvest contributed to variability in grain yield, reducing the explanatory capacity of production with the models.

Keywords: energy crops; remote sensing; spectral-temporal profile; agricultural monitoring; production estimation.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Geral.....	3
2.2 Específicos	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Crambe.....	4
3.1.1 Histórico e características da planta	4
3.1.2 Fertilidade do solo	5
3.1.3 Arranjo populacional	6
3.1.4 Épocas de semeadura e ciclo da cultura	6
3.1.5 Dados de produção e uso do crambe	7
3.2 Sensoriamento remoto	8
3.2.1 Conceito e a radiação eletromagnética (REM)	8
3.2.2 Comportamento espectral dos alvos.....	9
3.2.3 Monitoramento de culturas por Sensoriamento Remoto	10
3.2.4 Índices de vegetação.....	12
3.2.5 Sensores terrestres na estimativa de parâmetros agronômicos.....	14
REFERÊNCIAS	16
ARTIGO 1: CARACTERIZAÇÃO DO PADRÃO ESPECTRO-TEMPORAL DA CULTURA DO CRAMBE (<i>Crambe abyssinica</i> H.) POR MEIO DE SENSOR HIPERESPECTRAL	21
1 INTRODUÇÃO	22
2 MATERIAL E MÉTODOS	24
2.1 Caracterizações da área de estudo e implantação da cultura	24
2.2 Amostragem	25
2.3 Coletas de informações hiperespectrais	25
2.4 Caracterização do Padrão Espectro-temporal	26
2.5 Cálculos dos Índices de vegetação.....	26
2.6 Análises estatísticas	27
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
3.1 Caracterização do padrão espectro-temporal	28

3.1.1	Safra 2014	28
3.1.2	Safra 2015	32
3.2	Índices de vegetação	34
3.2.1	NDVI	34
3.2.1.1	Análise estatística NDVI	34
3.2.1.2	Perfil temporal NDVI	35
3.2.2	SAVI	37
3.2.2.1	Análise estatística SAVI	37
3.2.2.2	Perfil temporal SAVI	38
4	CONCLUSÕES	40
	REFERÊNCIAS	41
	ARTIGO 2: POTENCIAL DE SENSORES ESPECTRAIS TERRESTRES NA ESTIMATIVA DE RENDIMENTO DO CRAMBE (<i>Crambe abyssinica</i> H.)	45
1	INTRODUÇÃO	46
2	MATERIAL E MÉTODOS	48
2.1	Unidade experimental	48
2.2	Amostras experimentais	48
2.3	Coleta dos dados espectrais	49
2.3.1	Sensor FieldSpec® 4 Hi-Res	50
2.3.2	Sensor Greenseeker® 505 Handheld Sensor	51
2.4	Composição das faixas espectrais e geração de Índices de vegetação	51
2.5	Dados climatológicos e Rendimento de grãos	52
2.6	Análises estatísticas	52
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS	60
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
	APÊNDICES	64

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

Tabela 1	Calendário das informações espectrais do crambe – safras 2014 e 2015....	25
Tabela 2	Análise exploratória do índice de vegetação NDVI do crambe, safra 2014.....	33
Tabela 3	Análise exploratória do índice de vegetação NDVI do crambe, safra 2015.....	34
Tabela 4	Análise exploratória do índice de vegetação SAVI do crambe, safra 2014.....	37
Tabela 5	Análise exploratória do índice de vegetação SAVI do crambe, safra 2015.....	37

ARTIGO 2

Tabela 1	Dias após semeadura – DAS e fases fenológicas correspondentes às coletas de informações espectrais.....	48
Tabela 2	Faixas espectrais e índices de vegetação gerados.....	50
Tabela 3	Coeficiente de correlação por postos de Sperman (rs) entre dados espectrais (faixas espectrais e índices de vegetação – IVs) nas fases de desenvolvimento e rendimento de grãos de crambe.....	54
Tabela 4	Parâmetros e equações dos modelos de regressões lineares entre dados espectrais (faixas espectrais e índices de vegetação-IVs) nas fases de desenvolvimento e rendimento de grãos de crambe.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	a) Partes da planta; b) Folhas; c) Flor; d) Siliquia.....	5
Figura 2	Espectro eletromagnético.....	8
Figura 3	Incidência, reflexão, absorção e transmissão de energia eletromagnética....	9
Figura 4	Reflectância espectral característica de uma folha verde sadia.....	10

ARTIGO 1

Figura 1	Áreas experimentais de crambe, Cascavel-PR.....	23
Figura 2	Unidades de observação do crambe 2014 e 2015.....	24
Figura 3	Médias diárias dos padrões espectrais baseados em dias de coletas ao longo do ciclo de desenvolvimento do crambe, safra 2014.....	28
Figura 4	Comportamento espectral na faixa do vermelho (620 a 700 nm) das fases fenológicas Plântula e início de Crescimento Vegetativo, safra 2014.....	29
Figura 5	Comportamento espectral nas faixas do azul (400 a 500 nm) e vermelho (620 a 700 nm), safra 2014.....	29
Figura 6	a) Comportamento espectral na faixa do infravermelho próximo – IVP das fases fenológicas de Floração – 56 DAS e Floração / Granação – 88 DAS; b) Registro fotográfico do dossel de plantas em 56 DAS, safra 2014.....	30
Figura 7	Média do padrão espectral da fase de Maturação em 104 DAS, safra 2014.....	31
Figura 8	Médias diárias dos padrões espectrais baseados em dias de coletas ao longo do ciclo de desenvolvimento do crambe, safra 2015.....	32
Figura 9	Valores mínimos, máximos e curva composta por médias diárias dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) do crambe, safra 2014 e 2015.....	35

Figura 10	Valores mínimos, máximos e curva composta por médias diárias dos Índices de Vegetação ajustado ao solo – SAVI do crambe, safra 2014 e 2015.....	38
-----------	---	----

ARTIGO 2

Figura 1	Amostras experimentais na área de crambe.....	47
Figura 2	Posicionamento do sensor FieldSpec® 4 Hi-Res, modo passivo para coleta de informações espectrais.....	49
Figura 3	Exemplo de leitura de folha com sensor FieldSpec® 4 Hi-Res, modo ativo.....	49
Figura 4	Posicionamento do sensor Greenseeker® 505 Handheld para coleta de informações espectrais.....	50
Figura 5	Dados climatológicas durante o ciclo de desenvolvimento do crambe.....	52
Figura 6	Velocidade diária máxima dos ventos nas fases de floração/granação; granação e maturação do crambe.....	53
Figura 7	a) Análises de regressão linear entre NDMI na fase fenológica de floração (66 DAS) do crambe e rendimento de grãos; b) Análises de regressão linear entre faixa espectral do vermelho na fase fenológica de floração (66 DAS) do crambe e rendimento de grãos.....	56

1 INTRODUÇÃO

Crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) é uma oleaginosa de inverno, implantada no Brasil em 1995 pela Fundação MS como alternativa na rotação de culturas e na adubação de cobertura nas lavouras em pousio.

Seu desenvolvimento é compreendido pelas fases fenológicas de emergência, plântula, crescimento vegetativo, floração, granação e maturação. De ciclo curto (78 a 120 dias, dependendo da região de cultivo), baixo custo de implantação e produção, tolerante a geadas moderadas e períodos de estiagem ao iniciar a floração, é capaz de reciclar os nutrientes do solo e disponibilizar para as culturas sucessoras. Devido à sua raiz pivotante, tem potencial de descompactar camadas superficiais do solo (OLIVEIRA et al., 2015).

O principal produto é o óleo, extraído das sementes de forma mecânica ou por solventes. Composto por aproximadamente 55% de ácido erúxico, apresenta estabilidade à oxidação superior a diversas culturas oleaginosas, o que o torna um fluido renovável com possibilidade de uso para diversos fins.

O óleo de crambe tem mercado estabilizado no Reino Unido, onde é empregado na indústria de polímeros e lubrificantes, além do uso como inibidor de corrosão, filmes plásticos, náilon e fluido adesivo (PITOL; BROCH; ROSCOE, 2010).

No Brasil, o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) definiu o crambe como cultura alternativa para o processo produtivo de Biodiesel. Além disso, pesquisas realizadas no oeste do Paraná demonstram que a partir do óleo extraído da planta é possível produzir fluido isolante de qualidade para aplicação em transformadores de potência utilizados na rede elétrica.

Ao extrair o óleo, de forma mecânica, é gerada a torta de crambe: um subproduto recomendado na substituição parcial de fontes de proteínas empregadas na alimentação de animais, como bovinos e ovinos.

Diversas pesquisas vêm sendo realizadas a nível nacional com intuito de avaliar o potencial produtivo da cultura nas diversas regiões, caracterizar e aplicar o óleo na produção de diversos produtos e testar o potencial da torta na alimentação animal. No entanto, estudos que caracterizem o comportamento espectro-temporal do crambe são inexistentes, impedindo a quantificação de áreas cultivadas com a cultura no país.

A caracterização espectro-temporal das culturas provém de informações espectrais obtidas por ferramentas do sensoriamento remoto. Dentre elas, imagens de satélites e dados coletados *in loco* por sensores terrestres ao longo do ciclo de desenvolvimento das plantas.

O conhecimento dos dados espectrais de culturas anuais como o crambe são fontes de informações utilizadas no monitoramento das lavouras, identificação de possíveis

ataques de pragas, doenças, déficit hídrico e/ou nutricional, o que confere metodologia de suma importância no gerenciamento de lavouras, previsão de safras por órgãos oficiais e ferramenta na gestão econômica do país.

Neste escopo, o presente estudo busca caracterizar o padrão espectro-temporal do crambe nas diferentes fases fenológicas, fomentando futuras pesquisas e fornecendo informações para identificação, delimitação, monitoramento e quantificação das áreas cultivadas com a planta no Brasil, além de identificar as etapas de desenvolvimento da cultura e faixas espectrais com maior potencial na estimativa de rendimento de grãos.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Determinar o padrão espectro-temporal do crambe obtido por sensores terrestres e a relação das informações espectrais com o rendimento de grãos da planta, no município de Cascavel, Paraná.

2.2 Específicos

- Caracterizar o padrão espectro-temporal do crambe, obtido por meio de sensor terrestre passivo, relacionando o padrão espectral da cultura do crambe com suas fases fenológicas.
- Avaliar a relação entre faixas espectrais e índices de vegetação, obtidos em diferentes estágios fenológicos por sensores espectrais terrestres, com o rendimento de grãos da cultura do crambe.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Crambe

3.1.1 Histórico e características da planta

O crambe (*Crambe abyssinica* Hoechst) é uma oleaginosa pertencente à família das *Brassicaceae*, próxima ao nabo-forrageiro (*Raphanus sativus* L.) e à canola (*Brassica napus* L.). Originária da Etiópia, foi adaptada às regiões secas e frias do Mediterrâneo (DESAI, 2004).

Pesquisado inicialmente na antiga União Soviética em 1933, faz parte de programa de reprodução de sementes sueco deste 1949; expandiu para os Estados Unidos da América em 1940; e tem registro de cultivo na África, Ásia, Europa e América do Sul (OPLINGER et al., 1991).

No Brasil, sua pesquisa iniciou em 1995 por meio da Fundação MS, localizada no estado do Mato Grosso do Sul, visando o uso como planta de cobertura no sistema de plantio direto. Com o estímulo ao uso do Biodiesel, foi desenvolvida a primeira cultivar brasileira para produção de óleo, a FMS Brilhante. Atualmente, há lavouras comerciais no triângulo Mineiro, Goiás e Mato Grosso do Sul e pesquisas em diversos estados; no Paraná, seu uso como fluído isolante em equipamentos elétricos vem sendo testado (OLIVEIRA et al., 2015; PITOL; BROCH; ROSCOE, 2010; SOUSA, 2014).

O gênero *Crambe* possui cerca de trinta espécies, maiorias perenes e poucas de cultivo anual, dentre estas o *Crambe abyssinica* Hochst: planta ereta que possui cerca de um metro de altura, haste com ramificações próximas ao solo, podendo formar mais de 30 galhos secundários, os quais originam galhos terciários (DESAI, 2004).

Apresenta folhas ovais, assimétricas, variando de tamanho ao longe dos ramos (Figuras 1a e 1b). Suas flores são brancas, de pétalas de 2,5 a 6 mm (Figura 1c). Produzem frutos denominados síliquias, inicialmente verdes, tornando-se marrons ao chegar a maturidade. Cada fruto possui uma pequena semente esférica de cor verde a marrom esverdeado, de 0,8 a 2,6 mm de diâmetro (Figura 1d), que apresentam até 38% de óleo, rico em ácido erúico (55%) (OYEN et al., 2007).

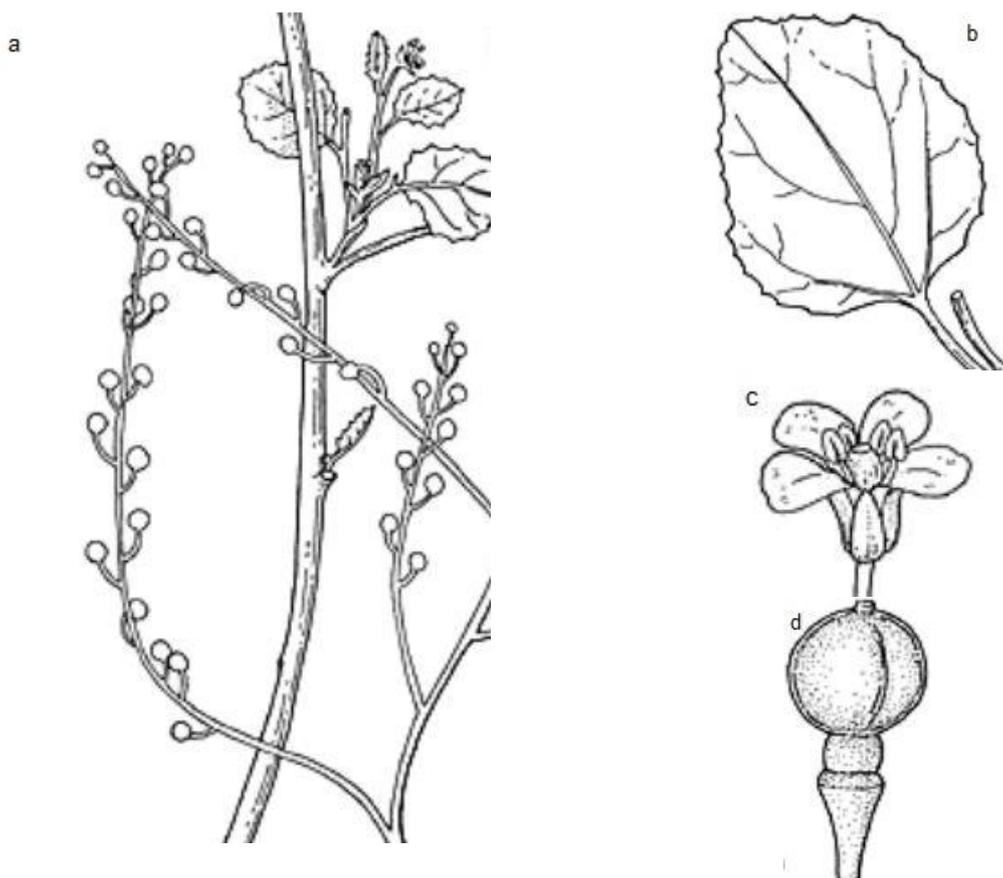


Figura 1 a) Partes da planta; b) Folhas; c) Flor; d) Siliquia.
 Fonte: Adaptado de Oyen et al. (2007).

3.1.2 Fertilidade do solo

Segundo Malavolta (1980), qualquer planta necessita de elementos essenciais para seu desenvolvimento, como nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). Para Epstein e Bloom (2004), quando há a deficiência de qualquer nutriente, geram-se anomalias, reduzindo o potencial produtivo da cultura.

O cultivo de crambe é indicado em solos profundos, corrigidos com pH acima de 5,8. Seu rendimento de grãos é prejudicado quando há presença de alumínio trocável e baixos teores de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) (PITOL, 2008).

O crambe é considerado uma planta recicladora de nutrientes e com bom aproveitamento de nutrientes de adubações residuais das culturas antecessoras, devido principalmente ao sistema radicular pivotante. Portanto, em solos corrigidos e com elevados níveis de P e K não responde à adubação de base (PITOL; BROCH; ROSCOE, 2010).

No entanto, responde à aplicação de N e enxofre (S) via foliar, elevando valores de massa seca, altura de plantas, peso de 1000 grãos e rendimento (PANNO; FERNANDES, 2011). Para Souza et al. (2009), o crambe necessita de elevada quantidade de nitrogênio, devido ao alto teor de proteínas nos grãos.

3.1.3 Arranjo populacional

A distribuição espacial das plantas em determinada área compreende o arranjo populacional. Este é formado por densidade de plantas (número de plantas por metro) e espaçamento entre linhas (distância horizontal entre plantas). A variação deste arranjo interfere na disponibilidade de nutrientes e absorção da radiação solar das plantas, o que influencia na produção final (VIANA, 2013).

Na implantação do crambe são recomendadas densidades de semeadura entre 8 a 24 kg ha⁻¹ de sementes, variáveis conforme o tipo de solo de cada região de cultivo (MAEKAWA JUNIOR et al., 2006; VIANA et al., 2015). O espaçamento entre linhas, segundo Freitas (2010), pode variar entre 0,17 e 0,51 m.

O espaçamento entrelinhas não interfere no rendimento de grãos devido ao potencial de ramificação do crambe em baixas populações. Porém, menores espaçamentos em solos arenosos reduzem a competitividade da cultura com plantas daninhas (PITOL; BROCH; ROSCOE, 2010).

3.1.4 Épocas de semeadura e ciclo da cultura

Para uma planta se desenvolver adequadamente são necessários considerar três fatores: condições hídricas, níveis de radiações solares e temperaturas mínima e máxima toleráveis. Quando um destes fatores são desconsiderados, a cultura tem crescimento e produção reduzidos (OLIVEIRA et al., 2013).

O crambe requer boa umidade no solo no momento de sua implantação e durante seu desenvolvimento, assim como precipitações entre 150 a 200 mm até o floração (MOERS et al., 2012). O excesso de chuvas e umidade após a floração favorece a debulha dos grãos e o aparecimento de doenças fúngicas que afetam o rendimento (PITOL; BROCH; ROSCOE, 2010).

Para alcançar resultados expressivos de produção, durante o desenvolvimento vegetativo, temperaturas entre 15 e 25 °C são recomendadas. No entanto, a planta tolera temperaturas de até -6 °C e geadas, exceto durante as fases de plântula e floração, quando é sensível a geadas forte (FALASCA et al., 2010; FOWLER, 1991; KMEC et al., 1998; ROSCOE, et al. 2010).

Recomendado para rotação de culturas, no Brasil é uma alternativa para cultivo na entressafra e na safra de inverno, sendo semeado entre os meses de abril e julho. Porém, apresenta queda no rendimento de grãos em épocas mais tardias devido à redução no somatório graus-dias e à precipitação inferior à necessidade mínima da cultura (VIANA, 2013).

O ciclo da cultura é formado pelas fases fenológicas de emergência, plântula, crescimento vegetativo, floração, granação e maturação. A duração da semeadura à colheita é variável de 75 e 139 dias, dependendo da região de semeadura (OLIVEIRA et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2015; PITOL; BROCH; ROSCOE, 2010).

A semeadura é recomendada entre o final de abril e meados de julho no Oeste do Paraná, reduzindo o rendimento de grãos em cultivos mais tardios (SANTOS et al., 2016). Barbizan (2011) encontrou melhores resultados quando semeada no início de março na região sudoeste paranaense.

Reginato et al. (2013) obteve maior rendimento com a cultura do crambe, quando semeada no início de abril em Dourados, MS. Pitol, Broch e Roscoe (2010) recomendam semear a cultura do crambe do início de abril a 15 de maio na região sul do Mato Grosso do Sul; de 20 de março a 20 de abril na região central do estado e de 20 de fevereiro a 30 de março na região norte de Mato Grosso do Sul, Mato Grosso e Goiás.

3.1.5 Dados de produção e uso do crambe

Pesquisas demonstram que o rendimento médio de grãos obtido pelo crambe é variável entre épocas de semeadura e regiões de cultivo. Em experimento conduzido com objetivo de estimar a eficiência energética na produção de crambe no município de Botucatu, SP foram obtidos valores de aproximadamente 1500 kg ha⁻¹ de grãos (JASPER et al., 2010).

Em Dourados, estado do Mato Grosso do Sul, Freitas (2010) obteve produção de 1143 kg ha⁻¹ de grãos ao avaliar doses de fertilizantes. Já Pitol, Broch e Roscoe (2010) conduziram diversos experimentos e em diferentes estados do Brasil. Ao avaliarem a resposta do crambe em relação às doses de potássio, alcançaram valores superiores a 2200 kg ha⁻¹ em Maracaju, MS e próximos a 1325 kg ha⁻¹ em Rio Verde, GO. Ao testarem densidade de semeadura do crambe no município de Lucas do Rio Verde, MT, verificaram rendimento de grãos inferior a 1200 kg ha⁻¹.

No município de Cascavel, PR diversos experimentos foram conduzidos. Silva et al. (2011), avaliando doses de P₂O₅ (0; 40; 80 e 120 kg ha⁻¹), obtiveram rendimento máximo de aproximadamente 1928 kg ha⁻¹ com a maior dose do fertilizante.

Viana et al. (2015), em pesquisa testando as densidades de semeadura de 8; 12; 17,5 e 24 kg ha⁻¹, atingiram, com a menor densidade, produção de 2218 kg ha⁻¹ de grãos.

Santos et al. (2016), ao avaliarem épocas de semeadura (abril, junho e julho) no mesmo município, verificaram diferença significativa no rendimento de grãos de crambe. Plantios mais tardios apresentaram queda no rendimento, sendo que em abril a máxima foi de 1982 kg ha⁻¹, e, em julho, 530 kg ha⁻¹ de produção de grãos.

Com teores de óleo entre 36 e 38% nas sementes, pode-se atingir valores próximos a 870 kg ha⁻¹ do produto. O maior consumidor é o Reino Unido, que utiliza o óleo na produção de polímeros e lubrificantes industriais, principalmente devido ao alto teor de ácido erúxico (55%), que confere elevada resistência a degradação e maior estabilidade no armazenamento (PITOL; BROCH; ROSCOE, 2010).

No Brasil, o óleo de crambe é apresentado como alternativa na produção de biodiesel e fluído isolante em transformadores, disjuntores e outros componentes da rede elétrica (BASSEGIO et al., 2016).

Segundo estudos realizados por Oliveira et al. (2015) em Cascavel, PR, após a extração de óleo por prensagem mecânica produz-se a torta de crambe, subproduto com proteína bruta superior a 20%. Quando inserida na dieta de ruminantes em substituição ao farelo de soja, 25 e 50%, proporcionam maior ganho de peso para ovinos. Para Mendonça et al. (2015), a torta de crambe pode ser utilizada em até 20% da dieta de bovinos de corte em confinamento.

3.2 Sensoriamento remoto

3.2.1 Conceito e a radiação eletromagnética (REM)

O sensoriamento remoto (SR) é a ciência responsável pela aquisição de informações da superfície terrestre sem realmente ter contato físico com o objeto sensoriado (CCRS, 2013).

As informações são captadas a partir da interação entre radiação eletromagnética (REM) e objetos terrestres, que, por meio de sensores terrestres, aéreos e orbitais, coletam comprimentos de ondas além da luz do “visível”, tais como infravermelho e micro-ondas (SOUZA, 2010).

A REM é formada por ondas eletromagnéticas que, para o SR, são configuradas como “termômetros-mensageiros”, com a função de captar as informações dos objetos terrestres e levá-las até os sensores. A faixa completa da REM compreende o espectro eletromagnético com ondas de radiações gama com comprimentos de 10⁻⁶ até ondas de rádio, da ordem de 100 m – Figura 2 (FIGUEIREDO, 2005).

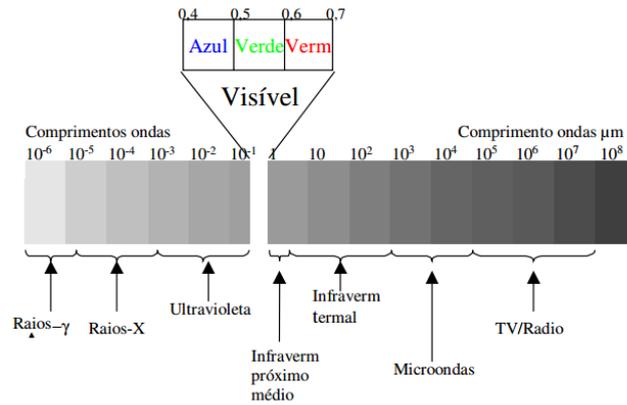


Figura 2 Espectro eletromagnético.
Fonte: Figueiredo (2005).

Os alvos da superfície terrestre têm a capacidade de reagir de diferentes formas com a REM e a partir destas diferenças o sensoriamento remoto pode ser aplicado em diversos setores da sociedade, dentre estes: em pesquisas ligadas a Geologia (mapeamento estrutural e unidades geológicas), Hidrologia (delineamento de inundações e umidade do solo), Mapeamentos (planimétricos e modelo digitais de terreno – MDT), características dos oceanos, cobertura do solo (urbana, rural e mapeamento da biomassa), Silvicultura (caracterização das espécies e monitoramento de queimadas) e Agricultura (mapeamento e caracterização de culturas e monitoramento de safras) (CIESIN, 2001).

3.2.2 Comportamento espectral dos alvos

A energia eletromagnética incide (I) sobre um alvo e pode ser absorvida (A), transmitida (T) e refletida (R) (Figura 3). A energia absorvida compreende a absorção pelo alvo, transmitida é a que passa pelo alvo e a refletida é a fração que o alvo reflete para a atmosfera (CCRS, 2013).

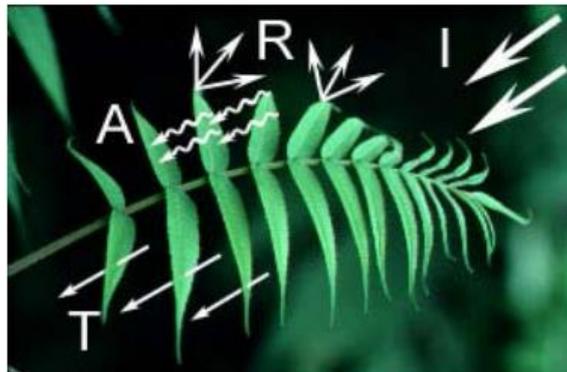


Figura 3 Incidência, reflexão, absorção e transmissão de energia eletromagnética.
Fonte: CCRS (2013).

Esta energia eletromagnética interage de diferentes formas com os alvos e cada objeto absorve e reflete energia de modo diferente para cada faixa do espectro eletromagnético, definindo seu padrão ou assinatura espectral. É neste contexto que o

sensoriamento remoto identifica os objetos, principalmente pela porcentagem de reflexão (FIGUEIREDO, 2005).

A reflexão em diversas partes do espectro eletromagnético é denominada reflectância espectral. Esta pode ser medida por sensores multiespectrais localizados a longas distâncias dos alvos e/ou por equipamentos denominados espectrorradiômetros localizados a centímetros dos objetos, subsidiando a determinação do comportamento espectral do alvo (JENSEN, 2009).

Comprimentos de ondas mais longas da faixa do visível e comprimentos de ondas da faixa do infravermelho próximo são mais absorvidas pela água. Comprimentos mais curtos de ondas do visível apresentam maior reflexão pela água. Já as folhas, que formam o dossel da vegetação, absorvem radiações nas faixas do azul e do vermelho e refletem mais no verde. No infravermelho próximo (IVP) é possível diferenciar uma folha “saudável” de uma “não saudável”, pois a primeira tem alto potencial de reflexão neste comprimento de onda, devido a sua estrutura interna (CCRS, 2013).

Em complemento, Jensen (2009) descreve que os fatores dominantes na reflectância foliar da faixa do visível são os pigmentos foliares, clorofila e β -caroteno. As principais bandas de absorção pela clorofila são em 430 a 450 nm e 650 a 660 nm. Na faixa do IVP o espalhamento no mesófilo esponjoso (estrutura celular) aumenta a reflectância entre 700 e 1300 nm, principalmente em uma planta verde sadia, e na faixa do infravermelho médio o conteúdo de água influencia no comportamento das folhas, aumentando a absorção nos comprimentos de onda de 970; 1190; 1450; 1940 e 2700 nm (Figura 4).



Figura 4 Reflectância espectral característica de uma folha verde sadia. Fonte: Adaptado de Swain (1978).

3.2.3 Monitoramento de culturas por Sensoriamento Remoto

O monitoramento e a estimativa de safras são ferramentas importantes para a economia do país, pois subsidiam agentes ligados à comercialização de produtos agrícolas por meio da mensuração do volume a ser produzido (MERCANTE, 2007), além de garantirem a produção estável das culturas e a segurança alimentar do país (JIN et al., 2016).

Para estimar o volume de produção de grãos por safra agrícola é necessário determinar a área semeada e o rendimento médio de cada cultura implantada. No Brasil, a estimativa é determinada por órgãos federais oficiais, como a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). No estado do Paraná, o cálculo cabe ao Departamento de Economia Rural (DERAL), ligado à Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento do Paraná (SEAB) (ANTUNES et al., 2012).

A metodologia nacional baseia-se primordialmente de informações coletadas junto aos produtores rurais e cooperativas agrícolas, dados de financiamento agrícola e históricos de produção, e não considera a distribuição espacial da produção nem a influência das condições agrometeorológicas no rendimento, tornando as estimativas de safras subjetivas e imprecisas (JOHANN et al., 2012).

No entanto, atualmente a CONAB inclui técnicas de sensoriamento remoto e modelos estatísticos para estimar área e rendimento de grãos nas principais regiões agrícolas do país. Precipitação acumulada, desvios da precipitação em relação ao padrão (déficit ou excesso hídrico), medidas espectrais das culturas e as fases fenológicas em que as plantas se encontram são parâmetros considerados nas previsões de safra (CONAB, 2017).

As medidas espectrais permitem a caracterização das culturas a partir de dados de reflectância gerados por observações diretas ou conversões de dados já adquiridos. Coletas em tempo quase real proporcionam a avaliação das condições de desenvolvimento e do potencial produtivo das culturas agrícolas, com baixo custo de aquisição comparado aos métodos convencionais aplicados às estimativas de safras (LOHMANN et al., 2009).

Coutinho et al. (2012) citam que para mapear e monitorar áreas de agricultura anual são necessárias informações espectro-temporais sincronizadas com o desenvolvimento fenológico das culturas. Para validar a abordagem, há necessidade de testar e ajustar os modelos para as diversas regiões e culturas inseridas no contexto nacional. A CONAB utiliza esta metodologia, e a partir das informações de reflectância das plantas são gerados os índices de vegetação.

Estudo conduzido no estado do Paraná visando a estimativa e o mapeamento de áreas com cultivo de soja e milho na safra de verão a partir de imagens espectro-temporais obtidas por SR orbital destacou a semelhança entre a estimativa pela técnica e a metodologia oficial baseada em pesquisas com produtores rurais e cooperativas ($R^2 > 0,84$)

(JOHANN et al., 2012). Souza et al. (2015) avaliou a capacidade do sensor orbital Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) em mapear grandes áreas agrícolas e diferenciar culturas anuais com fenologias semelhantes no Paraná. Os autores demonstraram que as áreas estimadas a partir de diferentes índices de vegetação obtidos com o sensor apresentaram baixa diferença quando comparado aos dados oficiais: 6% para cultura da soja e 11% para o cultivo de milho.

3.2.4 Índices de vegetação

Os índices de vegetação são medidas espectrais oriundas de combinações matemáticas de bandas espectrais das regiões do visível e infravermelho próximo. Essas faixas são fornecedoras de mais de 90% das informações espectrais da vegetação (VIÑA et al., 2011).

Geralmente se relacionam com parâmetros biofísicos da vegetação, como biomassa, índice de área foliar (IAF), teor de clorofila, cobertura verde, além de rendimento de grãos (JIANG et al., 2008), tornando ferramentas promissoras do sensoriamento para o monitoramento de culturas agrícolas (MOTOMIYA et al., 2014).

Diversos índices de vegetação foram gerados. Rouse et al. (1974) desenvolveram o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), variável de -1 a 1 (Equação 1):

$$NDVI = (\rho_{IVP} - \rho_V) / (\rho_{IVP} + \rho_V) \quad \text{Eq.(1)}$$

em que:

ρ_{IVP} - Banda do Infravermelho próximo;
 ρ_V - Banda do vermelho.

Com ampla aplicação no sensoriamento remoto das culturas agrícolas, o NDVI é uma importante ferramenta no monitoramento das mudanças sazonais e interanuais do comportamento espectral das plantas. O índice reduz ruídos como diferenças de iluminação solar, sombras de nuvens e algumas atenuações atmosféricas presentes nas bandas de imagens de diversas datas (JENSEN, 2009).

Para Bredemeier et al. (2013), as leituras de NDVI ao longo do ciclo de trigo de diferentes cultivares foram eficientes na identificação da variação de rendimento de grãos. Naser et al. (2014) encontraram precisão significativa entre rendimento de grãos de trigo e NDVI coletados nas fases de final de ciclo. Nguy-Robertson et al. (2012) citam que o NDVI é eficiente na estimativa do índice de área foliar (IAF) nas culturas de milho e soja em fases de desenvolvimento quando a biomassa do dossel é reduzida.

Onde há elevado aumento IAF ocorre a saturação do NDVI. Com isso, o índice se estabiliza em um patamar mesmo com aumento da densidade do dossel (ZANZARINI et al., 2013). A saturação acontece devido ao rápido alcance do pico de absorção da luz vermelha

e à continuidade do aumento da radiação do infravermelho ao aumento do IAF em dosséis totalmente cobertos de folhas (RIO et al., 2013).

Huete (1988) introduziu um fator de ajuste na equação do NDVI, gerando o Índice de Vegetação ajustado ao solo (SAVI) (Equação 2):

$$\text{SAVI} = (\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{V}}) (1 + L) / (\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{V}} + L) \quad \text{Eq.(2)}$$

em que:

ρ_{IVP} - Banda do Infravermelho próximo;

ρ_{V} - Banda do vermelho;

L - Fator de ajuste para o substrato do dossel da planta, que leva em conta, para o vermelho e para o infravermelho próximo, a extinção diferencial do dossel Huete (1988).

Huete, Justice e Liu (1994) verificaram que, aplicando $L = 0,5$, minimizavam-se as variações de brilho dos solos, eliminando a necessidade de calibrações adicionais para diferentes solos e diferentes tipos de dossel.

Valores de SAVI obtidos durante o desenvolvimento da cultura de algodão apresentaram forte correlação com IAF (R^2 : 0,97) em estudo conduzido por Silva et al. (2017). Em campo conduzido com arroz, o SAVI foi capaz de estimar biomassa e rendimento na fase de floração da cultura (NAITO et al., 2017).

Jin e Sader (2005) propuseram o Índice de Umidade na Diferença Normalizada (NDMI), que deriva das bandas espectrais do infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas dos sensores TM e ETM+, componentes dos satélites Landsat 5 e 7 (Equação 3):

$$\text{NDMI} = (\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{SWIR}}) / (\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{SWIR}}) \quad \text{Eq.(3)}$$

em que:

ρ_{IVP} - Banda do infravermelho próximo;

ρ_{SWIR} - Banda do infravermelho de ondas curtas.

Cosh et al. (2010) verificaram que o NDMI foi capaz de estimar o conteúdo de água nas culturas de trigo, alfafa e canola com precisão de 95,5%. O conhecimento do teor de água no dossel contribuiu para a estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação (WANG et al., 2013). Em consonância, o NDMI mostrou-se eficiente na estimativa de biomassa (R^2 : 0,97) durante quatro safras conduzidas na China por Jin et al. (2016).

3.2.5 Sensores terrestres na estimativa de parâmetros agronômicos

Sensores terrestres são importantes ferramentas na obtenção de medidas espectrais do dossel de culturas agrícolas, uma vez que realizam coleta da reflectância das plantas, possibilitando o acompanhamento do comportamento espectral durante as fases de crescimento; e podem gerenciar a variabilidade espacial de biomassa e a necessidade de fertilizantes, mesmo em condições em que não há possibilidade de gestão a partir da análise de imagens orbitais (SCHARF et al., 2011).

Os sensores atuam principalmente com as refletâncias do visível e infravermelho, que fornecem informações de índices de vegetações. Estes fornecem dados passíveis de correlacionar com reflectância do dossel das plantas e a biomassa existente, permitindo estimar rendimento das culturas (MA et al., 2001).

O sensor terrestre ativo GreenSeeker é uma ferramenta utilizada em diversas pesquisas agronômicas, que registra dados nas faixas do vermelho, infravermelho próximo e NDVI de plantas, os quais permitem monitorar a condição da cultura, potencial de rendimento, estresse, ataque de pragas e doenças e índices de nutrientes (NTECH INDUSTRIES, 2007).

Em estudo conduzido com milho, os índices de vegetação gerados a partir dos sensores terrestres GreenSeeker e Crop Circle ACS-210 foram capazes de diferenciar os tratamentos com doses de nitrogênio, além de estimar o rendimento de grãos de milho nos estádios de crescimento V10 (R^2 : 0,79 e 0,74, respectivamente) e V12 (0,87 e 0,84, respectivamente) (SHAVER et al., 2011).

Amaral et al. (2014) constataram resultados semelhantes no monitoramento da cana-de-açúcar em diversas áreas experimentais, utilizando três sensores de dossel (GreenSeeker e Crop Circle ACS-210 e ACS-430). Todos os sensores apresentaram correlação significativa com os valores de biomassa.

Vários estudos utilizam o sensor hiperespectral FieldSpec® 4 Hi-Res, que opera com comprimentos de onda (λ) de 350 a 2500 nm, nos modos ativo, gerando a energia incidente sobre o objeto sensoriado e passivo (dependente da energia solar) (ASD INC, 2015), o que possibilita análise do comportamento espectral das culturas além das faixas espectrais utilizadas pelos demais sensores terrestres citados.

Alves, Macrae e Koch (2015), utilizando o FieldSpec® 4 Hi-Res, constataram que o ataque do pulgão-da-soja influenciou na resposta espectral do dossel das plantas em diferentes fases fenológicas da soja, reduzindo a reflectância na faixa do infravermelho próximo e o NDVI.

Cattani et al. (2017) diferenciaram os padrões espectro-temporais de onze cultivares de trigo cultivadas no oeste paranaense, a partir de dados obtidos com sensores Greenseeker e FieldSpec® 4 Hi-Res. Os valores de diferentes índices de vegetação

acumulados entre os estádios Feekes 2 e 8 apresentaram correlação com o rendimento de grãos. NDVI apresentou correlação linear de Pearson de 0,41, INSEY DAS (IN-Season Estimate of Yield, dias após a semeadura) de 0,57 e INSEY GDD (Somatório graus-dia) apresentou correlação de 0,70 com o rendimento de grãos.

Foster et al. (2016) citam que o NDVI obtido pelo sensor hiperespectral apresentou forte correlação com a biomassa de sorgo, em estudo conduzido em duas safras nos Estados Unidos da América.

Piekarczyk, Sulewska e Szymanska (2011), ao avaliarem as relações entre refletâncias coletadas durante o ciclo da canola com sensores hiperespectrais e o rendimento de grãos, constataram maior correlação (R^2 : 0,86) entre NDVI gerado por meio de informações espectrais coletadas com o sensor ASD FieldSpec Pro e rendimento de grãos, no início da floração da planta.

REFERÊNCIAS

- ALVES, T. M.; MACRAE, I. V.; KOCH, R. L. Soybean Aphid (Hemiptera: Aphididae) Affects Soybean Spectral Reflectance. **Journal of Economic Entomology**, v. 108, n. 6, p. 2655-2664, 2015.
- AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P.; PORTZ, G.; FINAZZI, F. B.; CORTINOVE, L. Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. **Precision Agriculture**, v. 16, n. 1, p. 15-28, 2014.
- ANTUNES, J. F. G.; MERCANTE, E.; ESQUERDO, J. C. D. M.; LAMPARELLI, R. A. de C.; ROCHA, J. V. Estimativa de área de soja por classificação de imagens normalizada pela matriz de erros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1288-1294, 2012.
- ASDINC. **FieldSpec4 – User manual**. ASD Document 600979. Boulder-CO: PANalytical Company, 2015. 87 p.
- BARBIZAN, T. **Parâmetros agronômicos de crambe cultivado no sudoeste do Paraná**. 2011. 70f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Agronomia). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.
- BASSEGIO, D.; ZANOTTO, M. D.; SANTOS, R. F.; WERNCKE, I.; DIAS, P. P.; OLIVO, M. Oilseed crop crambe as a source of renewable energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 311-321, 2016.
- BREDEMEIER, C.; VARIANI, C.; ALMEIDA, D.; ROSA, A. T. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, v. 43, n. 7, p. 1147-1154, 2013.
- CATTANI, C. E. V.; MERCANTE, E.; JOHANN, J. A.; CORREA, M. M.; OLDONI, L. V. Spectral-temporal characterization of wheat cultivars through NDVI obtained by terrestrial sensors. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 11, p. 769-773, 2017.
- CCRS – CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING. **Fundamentals of Remote Sensing**. Intermap T ed. Natural Resources Canada. Government of Canada, 2013.
- CIESIN, C. FOR I. E. S. I. N. Remote Sensing Applications at the State and Local Level. User Workshop on Remote Sensing Applications at the State and Local Level, 2001. **Anais...** New York: Columbia University, 2001, p.30.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**. Décimo segundo levantamento, v.4, n. 12, Safra 2016/17. CONAB. Brasília, DF, 2017. 158p.
- COSH, M. H.; TAO, J.; JACKSON, T. J.; MCKEE, L.; O'NEILL, P. Vegetation water content mapping in a diverse agricultural landscape: National Airborne Field Experiment 2006. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 4, n. 1, p. 1-10, 2010.
- COUTINHO, A. C.; ESQUERDO, J. C. D. M.; OLIVEIRA, L. S. DE; LANZA, D. A. Avaliação de metodologia para o mapeamento e monitoramento da agricultura brasileira. In: 4º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 2012. **Anais...** Embrapa: Bonito, 2012, p. 364-372.
- DESAI, B. B. **Seeds handbook: biology, production processing and storage**. 2nd ed. New

York: Marcel Dekker, 2004.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: Editora Planta, 2004.

FALASCA, S. L.; FLORES, N.; LAMAS, M. C.; CARBALLO, S. M.; ANSCHAU, A. *Crambe abyssinica*: an almost unknown crop with a promissory future to produce biodiesel in Argentina. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 11, p. 5808-5812, 2010.

FIGUEIREDO, D. **Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto**. CONAB, 2005. 32 p.

FOSTER, A. J.; KAKANI, V. G.; MOSALI, J. Estimation of bioenergy crop yield and N status by hyperspectral canopy reflectance and partial least square regression. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 2, p. 192-209, 2016.

FOWLER, J. L. Interaction of Salinity and Temperature on the Germination of Crambe. **Agronomy Journal**, v. 83, n. 1, p. 169-172, 1991.

FREITAS, M. E. **Comportamento agrônômico da cultura do crambe (*Crambe abyssinica* hoechst) em função do manejo empregado**. 2010. 48 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Produção Vegetal). Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados, 2010.

HUETE, A.; JUSTICE, C.; LIU, H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, n. 3, p. 224-234, 1994.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.

JASPER, S. P.; BIAGGIONI, M. A. M.; SILVA, P. R. A.; SEKI, A. S.; BUENO, O. C. Análise Energética da cultura do crambe (*Crambe abyssinica* hochst) produzida em plantio direto. **Engenharia Agrícola**, p. 395-403, 2010.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres**. 2. ed. Tradução de José Carlos Neves Epiphany et al. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3833-3845, 2008.

JIN, S.; SADER, S. A. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 3, p. 364-372, 2005.

JIN, X.; KUMAR, L.; LI, Z.; XU, X.; YANG, G.; WANG, J. Estimation of winter wheat biomass and yield by combining the aquacrop model and field hyperspectral data. **Remote Sensing**, v. 8, n. 12, 2016.

JOHANN, J. A.; ROCHA, J. V.; DUFT, D. G.; LAMPARELLI, R. A. C. Estimativa de áreas com culturas de verão no Paraná, por meio de imagens multitemporais EVI/Modis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1295-1306, 2012.

KMEC, P.; WEISS, M. J.; MILBRATH, L. R.; ERIKSMOEN, E.; SCHATZ, B.; HANZEL, J.; HANSON, B. K. Growth analysis of crambe. **Crop Science**, v. 38, n. 1, p. 108-112, 1998.

LOHMANN, M.; DEPPE, F.; SIMÕES, K.; MERCURI, E. G. F. Monitoramento da Evolução

Temporal da Cultura da Soja no Estado do Paraná Utilizando Imagens TERRA/MODIS. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 2009. **Anais...** Natal: INPE, 2009, p.263-269.

MA, B. L.; DWYER, L. M.; COSTA, C.; COBER, E. R.; MORRISON, M. J. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. **Agronomy Journal**, v. 93, n. 6, p. 1227-1234, 2001.

MAEKAWA JUNIOR, M. T.; SANTOS FARAUM, R.; FREITAS LEAL, A. J. Produtividade de grambe (*Crambe abyssinica* hochst) em função de adubação, espaçamento e densidade de plantas. IN: XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 2006. **Anais...** Uberlândia-MG: Universidade Federal do Mato Grosso do Sul - UFMS, 2006. v. 2, p.1-4.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres., 1980.

MENDONÇA, B. P. C.; LANA, R. P.; DETMANN, E.; CASTRO, T. R. Torta de crambe na terminação de bovinos de corte em confinamento. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 67, n. 2, p. 583-590, 2015.

MERCANTE, E. **Dinâmica espectral da cultura da soja ao longo do ciclo vegetativo e sua relação com a produtividade na região oeste do Paraná**. 2007. 241f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

MOERS, E. M.; KUHN, O. J.; GONÇALVES JR., A. C.; FRANZENER, G.; STANGARLIN, J. R. Levantamento de doenças na cultura do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) na região oeste do Paraná. **Scientia Agraria Paranensis**, v. 11, n. 1, p. 35-48, 2012.

MOTOMIYA, A. V. DE A.; VALENTE, I. M. Q.; MOLIN, J. P.; MOTOMIYA, W. R.; BISCARO, G. A.; JORDAN, R. A. Índice de vegetação no algodoeiro sob diferentes doses de nitrogênio e regulador de crescimento. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 1, p. 169-178, 2014.

NAITO, H.; OGAWA, S.; VALENCIA, M. O.; MOHRI, H.; URANO, Y.; HOSOI, F.; SHIMIZU, Y.; CHAVES, A. L.; ISHITANI, M.; GOMEZ, S. M.; OMASA, K. Estimating rice yield related traits and quantitative trait loci analysis under different nitrogen treatments using a simple tower-based field phenotyping system with modified single-lens reflex cameras. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 125, p. 50-62, 2017.

NASER, M. A.; KHOSLA, R.; LONGCHAMPS, L.; MORAGUES, M.; HALEY, S.; REICH, R.; MCMMASTER, G. S.; BUCHLEITER, G. W. Can Active Sensor Based NDVI Consistently Classify Wheat Genotypes? **International Society of Precision Agriculture – ISPA**, 2014.

NGUY-ROBERTSON, A.; GITELSON, A.; PENG, Y.; VIÑA, A.; ARKEBAUER, T.; RUNDQUIST, D. Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. **Agronomy Journal**, v. 104, n. 5, p. 1336-1347, 2012.

NTECH INDUSTRIES. **Model 505 GreenSeeker Hand Held™ Optical Sensor Unit Operating Manual**. Ukiah-CA, 2007.

OLIVEIRA, R. C. de; AGUIAR, C. G. de; VIECELLI, C. A.; PRIMIERI, C.; BARTH, E. F.; BLEIL JUNIOR, H. G.; SANDERSON, K.; ANDRADE, M. A. de A.; VIANA, O. H.; SANTOS, R. F.; PARIZOTTO, R. R. **Boletim Técnico – Cultura do Crambe**. 1. ed. Cascavel: Assoeste, 2013. 70 p.

OLIVEIRA, R. C. de; REIS, A. C. C. S.; AGUIAR, C. G. de; VIECELLI, C. A.; PRIMEIRI, C.; TOMASI, G. A.; BLEIL JUNIOR, H. G.; ANDRADE, M. A. A.; VIANA, O. H.

Agroindustrialização do crambe. 2. ed. Cascavel: Assoeste, 2015.

OPLINGER, E. S.; OELKE, E. A.; KAMINSKI, A. R.; PUTNAM, D. H.; TEYNOR, T. M.; DOLL, J. D.; KELLING, K. A.; DURGAN, B. R.; NOETZEL, D. M. Crambe. **University of Wisconsin-Extension, University of Minnesota**, 1991. Disponível em: <<https://hort.purdue.edu/newcrop/afcm/crambe.html>>. Acesso em: 30 set. 2017.

OYEN, L. P. A.; VAN DER VOSSEN, H. A. M.; MKAMILO, G. S. *Crambe hispanica* L. Vegetable oils/Oléagineux. **PROTA**, 2007. Disponível em: <<https://www.prota4u.org/database/protav8.asp?fr=1&g=pe&p=Crambe+hispanica+L>>. Acesso em: 30 ago. 2017.

PANNO, A. G.; FERNANDES, F. C. S. Aplicação foliar de nitrogênio e enxofre no crambe. **Cultivando o Saber**, v. 4, n. 4, p. 13-25, 2011.

PIEKARCZYK, J.; SULEWSKA, H.; SZYMAŃSKA, G. Winter oilseed-rape yield estimates from hyperspectral radiometer measurements. **Questiones Geographicae**, v. 30, n. 1, p. 77-84, 2011.

PITOL, C.; BROCH, D. L.; ROSCOE, R. **Tecnologia e Produção Crambe 2010**. 1. ed. Maracaju-MS: Fundação MS, 2010. 60 p.

PITOL, C. **Cultura do crambe**. Tecnologia e Produção: Milho Safrinha e Culturas de Inverno - 2008. Fundação MS, 2008.

REGINATO, P.; SOUZA, C. M. A. de; SILVA, C. J. da; RAFULL, L. Z. L. Desempenho agrônomico e qualidade de sementes de crambe em diferentes épocas e profundidades de semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 10, p. 1410-1413, 2013.

RIO, A.; SIBALDELLI, R. N. R.; CRUSIOL, L. G. T.; CARVALHO, J. F. C.; FERREIRA, L. C.; NEIVERTH, W.; ALMEIDA, A. M. R.; PROCOPIO, S. O.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. Área foliar e comportamento espectral de cultivares de soja com diferentes hábitos de crescimento e sob distintos arranjos de plantas. In: VIII Jornada Acadêmica da Embrapa Soja, 2013. **Anais...** Londrina-PR: Embrapa Soja, 2013, p.18-22.

ROSCOE, R.; BROCH, D. L.; NERY, W. S. L. Análise de sensibilidade dos modelos agrícola e industrial de utilização do óleo de crambe na cadeia produtiva de biodiesel em mato grosso do sul. In: IV CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, & I SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE OLEAGINOSAS ENERGÉTICAS, 2010. **Anais...** João Pessoa-PB: EMBRAPA Algodão, 2010, p.332-340.

ROUSE, J.W.; HASS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite Symposium, 3., 1974, Washington. **Proceedings**. Washington: NASA, 1974. p. p.309-317.

SANTOS, R. F.; VIANA, O. H.; TOKURA, L. K.; SECCO, D.; LEWANDOSKI, C. F.; BUENO, P. L.; ANDO JUNIOR, O. H.; ALVES, H. J. Assessment of a crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) crop under no-tillage in different sowing dates. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 38, p. 3690-3695, 2016.

SCHARF, P. C.; SHANNON, D. K.; PALM, H. L.; SUDDUTH, KENNETH A.; DRUMMOND, S. T.; KITCHEN, N. R.; MUELLER, L. J.; HUBBARD, V. C.; OLIVEIRA, L.F. Sensor-based nitrogen applications out-performed producer-chosen rates for corn in on-farm demonstrations. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 6, p. 1683-1691, 2011.

SHAVER, T. M.; KHOSLA, R.; WESTFALL, D. G., Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize. **Precision Agriculture**, v.12, n.6, p. 892-904, 2011.

SILVA, M. A. V.; MOSCON, E. S.; SANTANA, C. C. Determination of biomass production of cotton using satellite images and spectral indexes. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 7, n. 2, p. 73-81, 2017.

SILVA, T. R. B. da; LAVAGNOLLI, R. F.; NOLLA, A. Zinc and phosphorus fertilization of crambe (*Crambe abyssinica* Hoechst). **Journal of Food, Agriculture and Environment**, v. 9, n. 1, p. 264-267, 2011.

SOUSA, V. S. de. **Desempenho, características de carcaça e parâmetros sanguíneos em ovinos santa inês suplementados com crambe abyssinica**. 2014. 72 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Ciências Animais). Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Universidade de Brasília - UNB. Brasília, 2014.

SOUZA, A. D. V. DE; FÁVARO, S. P.; ÍTAVO, L. C. V.; ROSCOE, R. Caracterização química de sementes e tortas de pinhão-mansão, nabo-forrageiro e crambe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 10, p. 1328-1335, 2009.

SOUZA, R. B. DE. Sensoriamento Remoto: conceitos fundamentais e plataformas. In: IV CEOS WGEDU WORKSHOP. "GEOTECHNOLOGIES FOR NATURAL DISASTER MONITORING IN LATINA AMERICA", 2010. **Anais...** Santa Maria-RS: Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2010. p.76.

SWAIN, P. H. **Remote sensing: the quantitative approach**. New York: International Book Company, 1978.

VIANA, O. H. **Cultivo de crambe na região oeste do Paraná**. 2013. 60 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura). Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Cascavel, PR, 2013.

VIANA, O. H.; SANTOS, R. F.; OLIVEIRA, R. C. de.; SECCO, D.; SOUZA, S. N. M.; TOKURA, L. K.; SILVA, T. R. B.; GURGACZ, F. Crambe (*Crambe abyssinica* H.) development and productivity under different sowing densities. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, n. 8, p. 690-695, 2015.

VIÑA, A.; GITELSON, A.; NGUY-ROBERTSON, A.; PENG, Y. Comparison of diferente vegetation indices for the remote assesment of green leaf área index of crops. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 12, p. 3468-3478, 2011.

WANG, L.; HUNT JR., E. R.; QU, J. J.; HAO, X.; DAUGHTRY, C. S. T. Remote sensing of fuel moisture content from canopy water indices and normalized dry matter index. **Remote Sensing of Environment**, v. 129, n. 1, p. 103-110, 2013.

ZANZARINI, F. V.; PISSARRA, T. C. T.; BRANDÃO, F. J. C.; TEIXEIRA, D. D. B. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat / ETM + com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 608-614, 2013.

ARTIGO 1: CARACTERIZAÇÃO DO PADRÃO ESPECTRO-TEMPORAL DA CULTURA DO CRAMBE (*Crambe abyssinica* H.) POR MEIO DE SENSOR HIPERESPECTRAL

RESUMO

O Crambe é uma oleaginosa com cultivo em expansão no Brasil devido às características do óleo que lhe conferem estabilidade a oxidação e qualificam para produção de diversos produtos. O conhecimento do padrão espectro-temporal da cultura do crambe torna-se uma importante ferramenta para o Sensoriamento Remoto poder identificar e quantificar as áreas já cultivadas em todo o território brasileiro. O estudo caracterizou espectralmente a planta, procurando relacionar o padrão espectral com as fases fenológicas da cultura ao longo de seu desenvolvimento. As informações espectrais foram obtidas *in loco* por sensor terrestre passivo em duas safras, de 2014 e de 2015, gerando, assim, o padrão espectro-temporal e o perfil temporal do crambe por meio dos índices de vegetação NDVI e SAVI. Durante as fases fenológicas de plântula e início de crescimento vegetativo, a banda espectral do vermelho apresentou maiores valores de reflectância. Isso ocorreu devido a cultura ainda não ter coberto totalmente o dossel e a resposta espectral ser influenciada pelo solo exposto. Para as fases fenológicas do final do crescimento vegetativo e início da floração ocorreu maior reflectância no infravermelho próximo e menor no infravermelho médio. Para as fases da granação e maturação houve redução da reflectância no infravermelho próximo e médio, devido à senescência das folhas e perda de conteúdo de água celular. Os perfis temporais de NDVI e SAVI demonstram crescimento linear até o pico vegetativo do crambe, caracterizado entre o fim da fase fenológica do crescimento vegetativo e o início da floração, momento em que a planta apresenta maior biomassa verde. No início da formação e no enchimento de grãos, amarelecimento das folhas e senescência, fases de granação e maturação, os valores de NDVI e SAVI foram reduzidos.

PALAVRAS-CHAVE: Sensoriamento remoto; comportamento espectral; *Brassicaceae*; Índices de vegetação; monitoramento agrícola.

ARTICLE 1: CHARACTERISATION OF THE SPECTRAL-TEMPORAL PATTERN OF THE CRAMBE (*Crambe abyssinica* H.) CROP USING HYPERSPECTRAL SENSORS

ABSTRACT

Crambe is an oleaginous plant mainly cultivated in Brazil due to its oil characteristics that provide stability to oxidation, qualifying it for use in a variety of products. Understanding the spectral-temporal pattern of the crambe crop is important to identify and quantify previously cultivated areas via remote sensing. This study spectrally characterised the plant, seeking to relate the spectral pattern to the phenological stages of the crop throughout its development. The spectral information was obtained *in loco* by passive terrestrial sensors in two harvests, thus generating the spectral-temporal pattern and the crambe temporal profile through the vegetation indices NDVI and SAVI. During the phenological phases of seedling and the beginning of vegetative growth, the spectral band of red showed higher values of reflectance, due to the fact that the crop did not cover the canopy completely and the spectral response was influenced by the exposed soil. During the stages at the end of the vegetative growth and the beginning of the flowering, there was a higher reflectance in the near infrared and a lower reflectance in the mid-infrared. For the granulation and maturation stages, the reflectance in the mean and near infrared reduced due to leaf senescence and loss of cellular water content. The temporal profiles demonstrate linear growth up to the vegetative peak, which occurs between the end of the phenological stage of the vegetative growth and the beginning of the flowering and highest amount of green biomass. At the beginning of grain formation and filling, yellowing of leaves and senescence, granulation and maturation stages, the NDVI and SAVI values were reduced.

KEYWORDS: Remote sensing; spectral behaviour; *Brassicaceae*; vegetation indices; agricultural monitoring.

1 INTRODUÇÃO

Crambe é uma crucífera, originária da Etiópia e com alto teor de óleo nas sementes, atingindo até 38% (KNIGHTS, 2002). Seu desenvolvimento é composto pelas fases fenológicas: plântula, crescimento vegetativo, floração, granação e maturação. Apresenta ciclo curto, entre 78 dias e 125 dias, variáveis conforme região de cultivo e época de semeadura (OLIVEIRA et al., 2013; VIANA, 2013).

No Brasil destaca-se como alternativa à produção de biodiesel, devido a sua rusticidade, precocidade, elevado teor de óleo e capacidade de adaptação a diferentes climas (SOUZA et al., 2016). Implantada em 1995 no país por meio da Fundação MS, atualmente apresenta uma variedade comercial que tem por objetivo a produção de óleo empregado na produção também de lubrificante industrial, inibidor de corrosão, filmes plásticos, náilon, adesivos e isolantes elétricos (JASPER et al., 2010; PITOL; BROCH; ROSCOE, 2010).

Pesquisas conduzidas no estado do Paraná durante as safras de inverno de 2010 a 2012 apresentaram rendimento de grãos entre 1500 a 2100 kg ha⁻¹ e óleo de 500 a 700 kg ha⁻¹ (SILVA et al., 2013; SANTOS et al., 2013; VIANA et al., 2015). No entanto, não há estudos relacionados ao comportamento espectral e monitoramento da cultura por sensoriamento remoto – SR.

As técnicas de SR são importantes ferramentas para monitorar o desenvolvimento e a expansão de áreas cultivadas com culturas agrícolas. Além de subsidiar a estimativa de produção no âmbito regional e nacional, permitem a caracterização das culturas a partir de dados de reflectância gerados nas faixas espectrais do visível, infravermelho próximo – IVP e infravermelho médio – IVM, além de conversões dos dados adquiridos (LOHMANN et al., 2009).

Coutinho et al. (2012) citam que para mapear e monitorar áreas de agricultura anual são necessárias informações espaciais e temporais da atividade agrícola nacional, sincronizadas com o desenvolvimento fenológico das culturas. Com isso, caracterizam o comportamento espectro-temporal que subsidiam a avaliação de forma precisa do potencial produtivo das plantas.

Entretanto, o mapeamento de culturas agrícolas por SR orbital ainda encontra alguns desafios. Em condições de cobertura total de solo, para a maioria dos atuais sensores orbitais, diferentes culturas podem parecer espectralmente semelhantes (YAO et al., 2015). Como forma para contornar isso, novas tecnologias vêm sendo testadas com o objetivo de analisar seu potencial de diferenciação espectral. Com a utilização de sensores hiperespectrais são adquiridas imagens com centenas de bandas espectrais estreitas e contínuas. Dessa forma, as imagens hiperespectrais têm substancialmente melhorado a

habilidade de distinguir múltiplas características de plantações agrícolas pela melhor diferenciação e estimação de atributos biofísicos (MULLA, 2013).

Os espectrorradiômetros de campo realizam as coletas radiométricas *in situ* fornecendo assim, não apenas dados detalhados sobre as características espectrais dos alvos, mas também podem permitir a aquisição dos valores físicos, como a radiância e a reflectância, que caracterizam espectralmente diferentes objetos, sem a interferência de fatores externos (MARTINS; GALO, 2015).

Os índices de vegetação são medidas espectrais provenientes de combinações matemáticas de faixas espectrais do vermelho (620 a 700 nm) e infravermelho próximo (IVP) (700 a 1300 nm), as quais são fornecedoras de mais de 90% das informações espectrais da vegetação (VIÑA et al., 2011). Para Motomiya et al. (2014), os índices de vegetação geralmente se relacionam com a biomassa, o teor de clorofila e o potencial produtivo das plantas.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) estão entre os mais empregados no monitoramento da evolução temporal da biomassa de culturas agrícolas (PONZONI; SIMABUKURO; KUPPLICH, 2012). Pesquisas demonstram que estas são ferramentas importantes no monitoramento do desenvolvimento das cultivares (RISSO et al., 2012) e apresentam correlação com rendimentos de grãos (BREDEMEIER et al., 2013; MONTEIRO et al., 2013). Uma série temporal de valores de NDVI de culturas agrícolas ao longo do seu ciclo vegetativo pode fornecer informações úteis sobre o estado de crescimento e o estado das culturas (LI et al., 2014).

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi caracterizar o padrão espectro-temporal do crambe, obtido por meio de sensor terrestre passivo, procurando relacionar o padrão espectral da cultura do crambe com suas fases fenológicas, fornecendo, assim, embasamento técnico para possíveis utilizações de imagens de satélites (SR orbital) no sentido de identificar, delimitar, mapear e monitorar áreas agrícolas com a cultura do crambe em larga escala.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterizações da área de estudo e implantação da cultura

O estudo foi conduzido durante as safras de 2014 e 2015 em áreas experimentais do Centro Universitário FAG, município de Cascavel, Paraná, latitude 24°56'1.21"S e longitude 53°30'41.63"W, altitude 700 m (Figura 1).

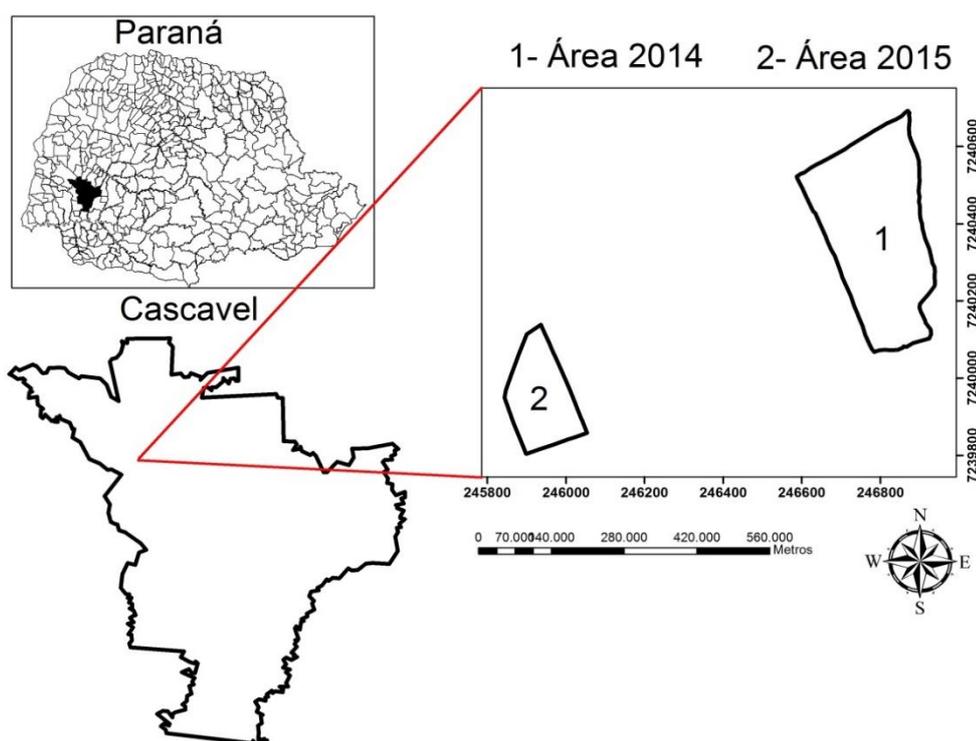


Figura 1 Áreas experimentais de crambe, Cascavel, PR.

Clima considerado, segundo Köppen, Cfa, com temperatura média no mês mais frio inferior a 18 °C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C, tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, geadas pouco frequentes e sem estação seca definida (IAPAR, 2011). O solo é classificado como Latossolo Vermelho distroférico (LVdf1) (SANTOS et al., 2011).

Foram implantados 12 ha e 4 ha em 2014 e 2015, respectivamente. Nas safras, o crambe foi semeado na segunda quinzena de abril no sistema de plantio direto, em área anteriormente cultivada com milho e soja. Foram plantadas sementes da cultivar FMS Brilhante, com auxílio de trator e conjunto semeadora/adubadora de 9 (nove) linhas em espaçamento entre linhas de 0,45 m e densidade de 12 kg ha⁻¹ de sementes (36 plantas por metro), sem adubação de base.

2.2 Amostragem

O experimento foi implantado com delineamento inteiramente casualizado (DIC). As coletas das informações espectrais na safra de 2014 foram determinadas a partir da unidade de observação compreendida pelo talhão de 12 ha de crambe. Aleatoriamente foram selecionadas e demarcadas a campo 12 amostras experimentais, caracterizadas como unidade experimental. Para seleção foram desconsideradas as plantas próximas ao limite do talhão, evitando o efeito da bordadura (Figura 2).

O mesmo procedimento foi realizado para a safra de 2015, considerando neste ano a unidade de observação, talhão de 4 ha semeado com crambe (Figura 2). Nas safras, em cada unidade experimental foram realizadas 4 coletas (repetições) das informações hiperespectrais por dia de sensoriamento.

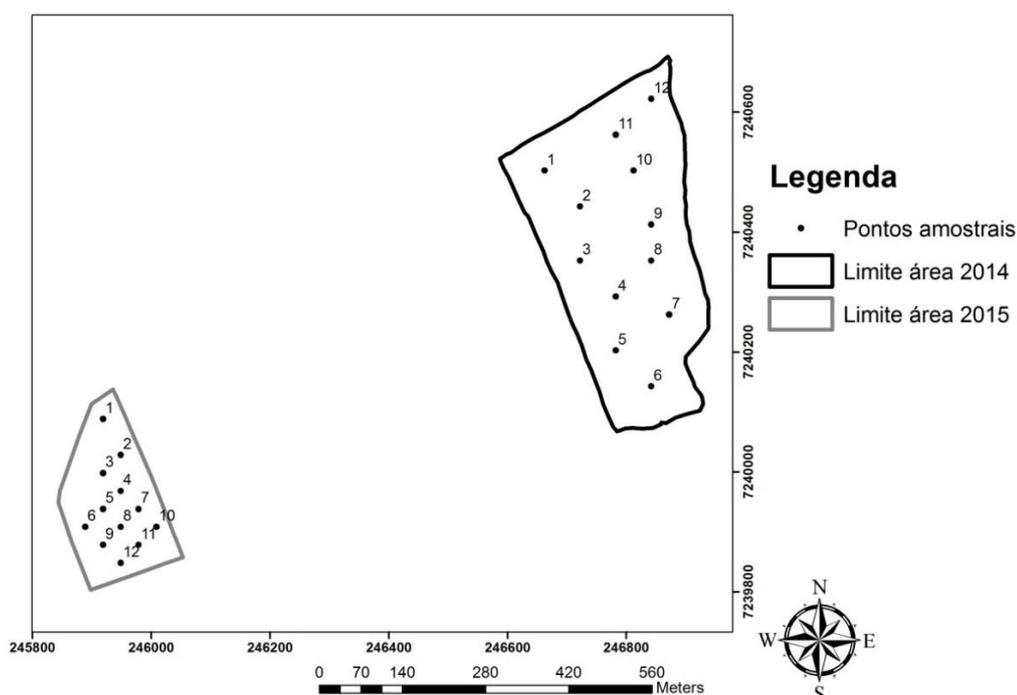


Figura 2 Unidades de observação do crambe 2014 e 2015.

2.3 Coletas de informações hiperespectrais

Na safra 2014 foram coletadas informações hiperespectrais em 5 dias distintos durante o desenvolvimento da cultura. Na safra 2015, foram coletadas 7 dias distintos (Tabela 1).

Tabela 1 Calendário das informações espectrais do crambe – safras 2014 e 2015

SAFRA	COLETA (DAS)	FASE FENOLÓGICA	SAFRA	COLETA (DAS)	FASE FENOLÓGICA
2014	24	Plântula/ Crescimento Vegetativo	2015	21	Plântula/ Crescimento Vegetativo
	41	Crescimento Vegetativo		34	Crescimento Vegetativo
	56	Floração		48	Crescimento Vegetativo
	88	Floração/ Granação		66	Floração
	104	Maturação		80	Floração/ Granação
			96	Granação	
			114	Maturação	

DAS – Dias após semeadura.

Na safra de 2014, devido à dificuldade de coleta de informações causada pelas condições climáticas, o número de dias de coleta foi menor que em 2015. No entanto, nas duas safras foi possível coletar informações espectrais em todas as fases fenológicas da cultura.

Os dados espectrais foram obtidos por meio do modo passivo do sensor hiperespectral FieldSpec® 4 Hi-Res, que opera nos comprimentos de onda (λ) de 350 nm a 2500 nm. As coletas das informações foram realizadas a 2,00 m de altura do solo e área sensoriada de 0,60 m² até o recobrimento total do dossel pelas plantas (48 DAS); a partir de 66 DAS as coletas foram realizadas a 0,80 m de altura do dossel de plantas e área sensoriada de 0,10 m²; sensor posicionado nas entrelinhas de semeadura com campo de visão de 25°.

Todas as medições ocorreram entre as 10:00 h e 12:00 h, obtendo a máxima radiação solar diária. Em campo, a cada 20 (vinte) minutos, o sensor foi otimizado e tomada a referência branca na superfície Spectralon®, definindo como reflectância máxima (1 ou 100% de reflectância) (ASD INC, 2015).

2.4 Caracterização do Padrão Espectro-temporal

As informações hiperespectrais dos 12 pontos amostrais foram agrupadas por dia de coleta no software Excel, calculadas as médias diárias e conseqüentemente gerados gráficos do padrão espectro-temporal de cada safra.

2.5 Cálculos dos Índices de vegetação

Foram geradas médias diárias de cada ponto amostral, totalizando 12 médias amostrais por dia de coleta. Para cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI foram selecionadas informações da faixa espectral entre 620 e 1300 nm e classificadas em duas bandas espectrais: Vermelho (620 a 700 nm) e Infravermelho próximo

(700 a 1300 nm) e aplicados na fórmula proposta por Rouse et al. (1974) (Equação 1), conforme Equação 1:

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{V}}) / (\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{V}}) \quad \text{Eq.(1)}$$

Onde:

ρ_{IVP} - Banda do Infravermelho próximo;

ρ_{V} - Banda do vermelho.

Outro índice gerado a partir das médias amostrais diárias foi o Índice de Vegetação ajustado ao solo – SAVI, baseado na fórmula proposta por Huete (1988), que introduziu fator de ajuste (L) entre -1 a +1 – Equação 2:

$$\text{SAVI} = (\rho_{\text{IVP}} - \rho_{\text{V}}) (1 + L) / (\rho_{\text{IVP}} + \rho_{\text{V}} + L) \quad \text{Eq.(2)}$$

Onde:

ρ_{IVP} - Banda do Infravermelho próximo;

ρ_{V} - Banda do vermelho;

L - Fator de ajuste para o substrato do dossel da planta, que leva em conta, para o vermelho e para o infravermelho próximo, a extinção diferencial do dossel Huete (1988).

Huete, Justice e Liu (1994) verificaram que, aplicando L= 0,5, minimizavam-se as variações de brilho dos solos, eliminando a necessidade de calibrações adicionais para diferentes solos e diferentes tipos de dossel.

2.6 Análises estatísticas

Os índices de vegetação foram tabelados e gerados gráficos com os perfis temporais das médias diárias de NDVI e SAVI do crambe nas safras 2014 e 2015. Ambos os perfis foram submetidos ao teste de normalidade através do método Shapiro-Wilk e à análise exploratória dos dados, no software Action Stat.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas duas safras avaliadas, o crambe apresentou ciclo em torno de 120 dias. Em 2014, a precipitação acumulada foi de 832 mm e em 2015, 827 mm. Para Pitol, Broch e Roscoe (2010), o excesso de precipitação durante o desenvolvimento da cultura propicia o aparecimento de doenças fúngicas e a debulha de grãos que afetam o rendimento de grãos.

Oliveira et al. (2015), em estudo conduzido na safra de inverno de 2014 com o crambe na mesma área experimental, constataram a incidência das doenças foliares, podridão negra e mancha de alternaria. Moers (2012), ao inocular a bactéria *Xanthomonas campestris* pv. *Campestris*, causadora da podridão negra nas plantas de crambe, verificou redução no rendimento de grãos de crambe quando comparado às plantas sem o inóculo da doença.

3.1 Caracterização do padrão espectro-temporal

3.1.1 Safra 2014

A Figura 3 representa o padrão espectral do crambe nas fases fenológicas de Plântula e início de Crescimento Vegetativo – 24 DAS (Dias após a semeadura); Crescimento Vegetativo – 41 DAS; Floração – 56 DAS e Floração / Granação – 88 DAS. As faixas sombreadas (1400 nm, 1800 a 1900 nm) foram desconsideradas devido à interação entre a energia eletromagnética e os gases presentes na atmosfera, o que impede o sensoriamento nestas bandas espectrais.

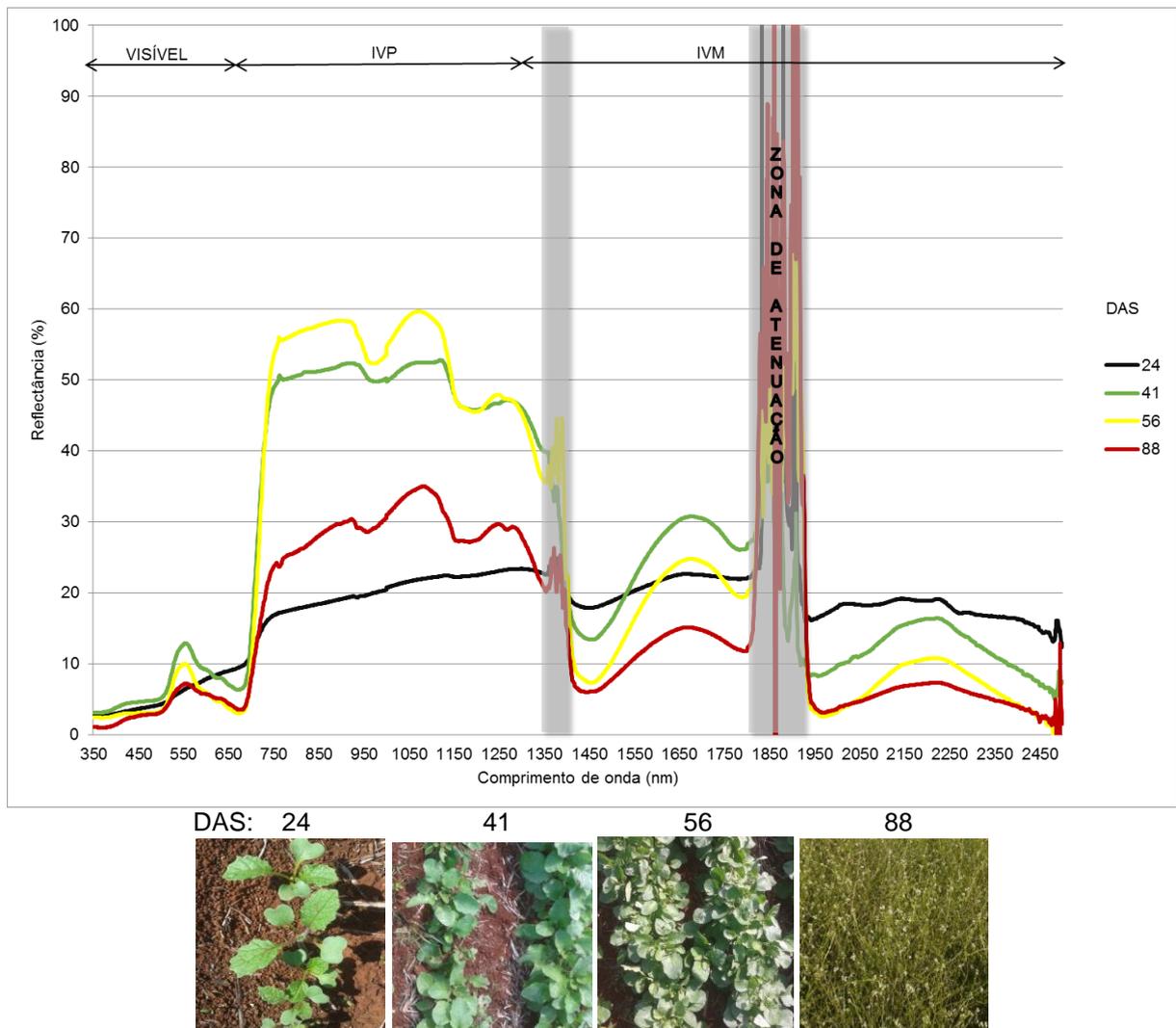


Figura 3 Médias diárias dos padrões espectrais baseados em dias de coletas ao longo do ciclo de desenvolvimento do crame, safra 2014.

É possível verificar que a curva que compreende a média das informações espectrais das fases fenológicas de Plântula e início de Crescimento Vegetativo em 24 DAS (linha preta) apresenta a maior reflectância da faixa espectral do vermelho (620 a 700 nm) quando comparada às curvas 41, 56 e 88 DAS (Figura 4). Este fato está relacionado à grande área de solo ainda exposto no momento de coleta de dados, devido à não cobertura total do solo pelo dossel de crame nestas fases fenológicas da cultura. O solo da área tem como componente o óxido de ferro, que lhe confere a tonalidade vermelha, o que pode ter contribuído para este comportamento (GENÚ; DEMATTÊ, 2012; SOUSA JUNIOR et al., 2008).

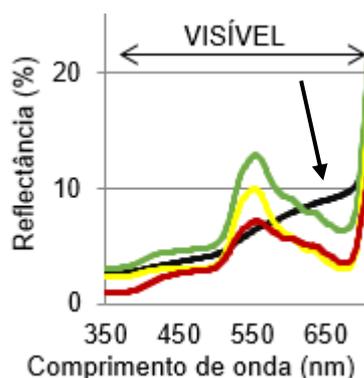


Figura 4 Comportamento espectral na faixa do vermelho (620 a 700 nm) das fases fenológicas Plântula e início de Crescimento Vegetativo, safra 2014.

As curvas das fases fenológicas de Crescimento Vegetativo e Floração da planta, 41 e 56 DAS (linhas verde e amarela, respectivamente), demonstram aumento gradativo na absorção dos comprimentos de ondas do azul (400 a 500 nm) e vermelho (620 a 700 nm) (Figura 5). Para Ponzoni, Simabukuro e Kuplich (2012) a clorofila presente nas folhas verdes das plantas absorvem estas regiões espectrais, convertendo em calor e energia armazenada por meio da fotossíntese. Estas curvas, comparadas ao início do ciclo (24 DAS), apresentam aumento na reflectância da faixa do verde devido à pigmentação das folhas.

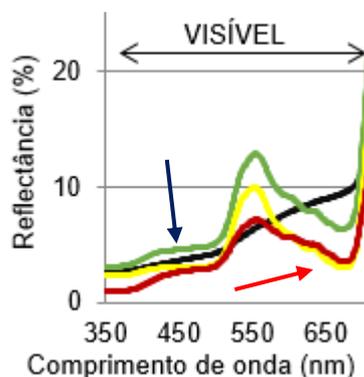


Figura 5 Comportamento espectral nas faixas do azul (400 a 500 nm) e vermelho (620 a 700 nm), safra 2014.

As maiores refletâncias na faixa do IVP (infravermelho próximo) (700 a 1300 nm) são representadas nas curvas das fases fenológicas de Floração – 56 DAS (linha amarela) e Floração / Granação – 88 DAS (linha verde), tendo o pico de reflexão na fase que compreende o início da floração (Figura 6a). Jensen (2009) destaca que a energia incidente sobre estrutura de uma folha verde e sadia gera espalhamento no mesófilo esponjoso e aumento na reflectância. Um exemplo deste tipo de ocorrência está destacada na Figura 6b, fase fenológica em que a planta possui maior biomassa durante o ciclo.

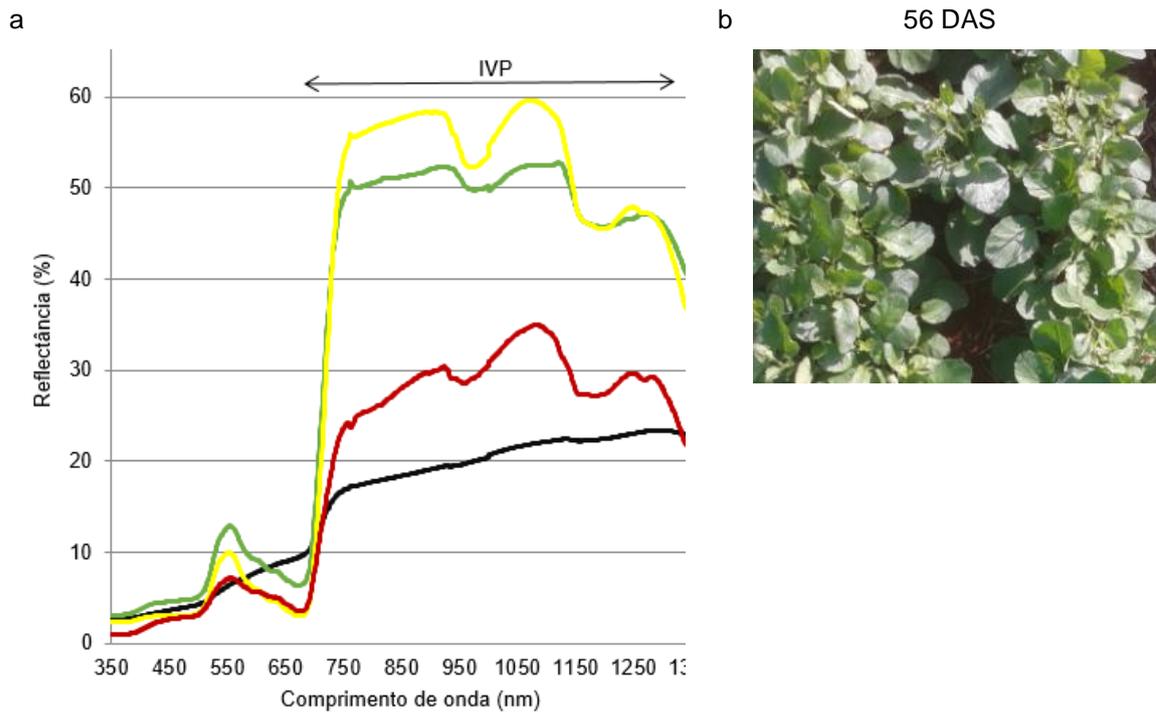


Figura 6a) Comportamento espectral na faixa do infravermelho próximo – IVP das fases fenológicas de Floração – 56 DAS e Floração / Granação – 88 DAS; b) Registro fotográfico do dossel de plantas em 56 DAS, safra 2014.

A Figura 7 destaca a fase de Maturação da planta – 104 DAS, caracterizada pelo aumento da reflectância na faixa do IVM (1300 a 2500 nm) quando comparado às curvas espectrais de 56 e 88 DAS. A senescência das folhas e a perda de água na estrutura celular são fatores que contribuem para tal comportamento.

Durante a coleta das informações hiperespectrais houve variação entre períodos de céu aberto e com presença de nuvens. A variação das condições climáticas influenciam na calibração do sensor utilizado e nos resultados; logo, podem ser responsáveis pelos picos de reflectância encontrados nas faixas do visível e IVP (Figura 7) (ASD INC, 2015).

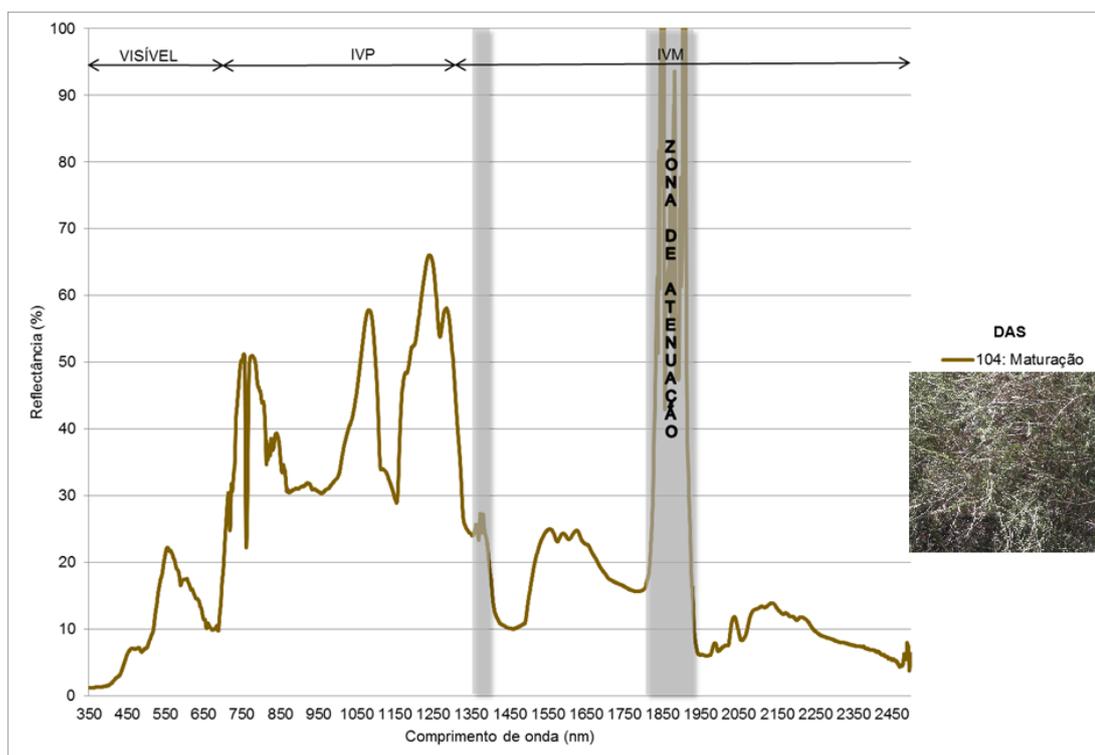


Figura 7) Média do padrão espectral da fase de Maturação em 104 DAS, safra 2014.

3.1.2 Safra 2015

A Figura 8 destaca o padrão espectral do crambe na safra 2015. A curva que representa a média de 21 DAS, transição entre a fase fenológica de Plântula e início de Crescimento Vegetativo, tem comportamento similar à mesma fase fenológica de 2014 (21 DAS): maior reflexão que as demais na faixa do vermelho, devido à presença de óxido de ferro no solo existente na maior parte da área sensoriada.

As curvas espectrais de 34, 48 e 66 DAS (fases fenológicas de Crescimento Vegetativo e Floração) demonstram que as plantas utilizam a energia absorvida nas faixas do azul e vermelho como fonte de energia para o crescimento, até atingir o pico de absorção no pleno Crescimento Vegetativo e início Floração (66 DAS); após este período, reduz o teor de clorofila nas folhas do dossel, além do início da ramificação e da floração da planta (Figura 8), acarretando aumento de reflectância.

No IVP, essas curvas apresentam aumento na reflectância espectral com pico de reflexão (aproximadamente 50%) relacionada à elevada biomassa das plantas presente no pleno crescimento vegetativo, início de floração (66 DAS). Já na faixa do IVM (infravermelho médio), o padrão espectral demonstra aumento de absorção (até 66 DAS) devido ao aumento de água no conteúdo celular do dossel. Para Datt (1998), folhas jovens com maior atividade fotossintética são responsáveis por este comportamento.

No final da fase de Floração e nas fases de Granação e Maturação, representadas pelas curvas espectrais de 80, 96 e 114 DAS, aumenta-se gradativamente a reflectância da

faixa espectral do vermelho. Ao transcorrer de seu desenvolvimento, as folhas perdem pigmentação, diminui a biomassa do dossel, reduzindo a absorção da faixa espectral, além do aumento de flores e grãos durante as fases de 80 e 96 DAS, que contribuem para tal comportamento (PINTO et al., 2017).

No IVP, estas curvas iniciam a redução da reflexão da energia incidente sobre o dossel devido a modificação na estrutura celular e proximidade a sua senescência. Na faixa espectral do IVM ocorre o inverso: a perda de água pelas folhas do dossel reduz a absorção da energia, principalmente nas bandas específicas de absorção de água (1450 e 1950 nm) (JENSEN, 2009). Tal comportamento é similar ao feijão (*Phaseolus vulgaris* L.): ao aproximar da maturação da planta, apresenta aumento da reflexão no IVM (PAPA, 2009).

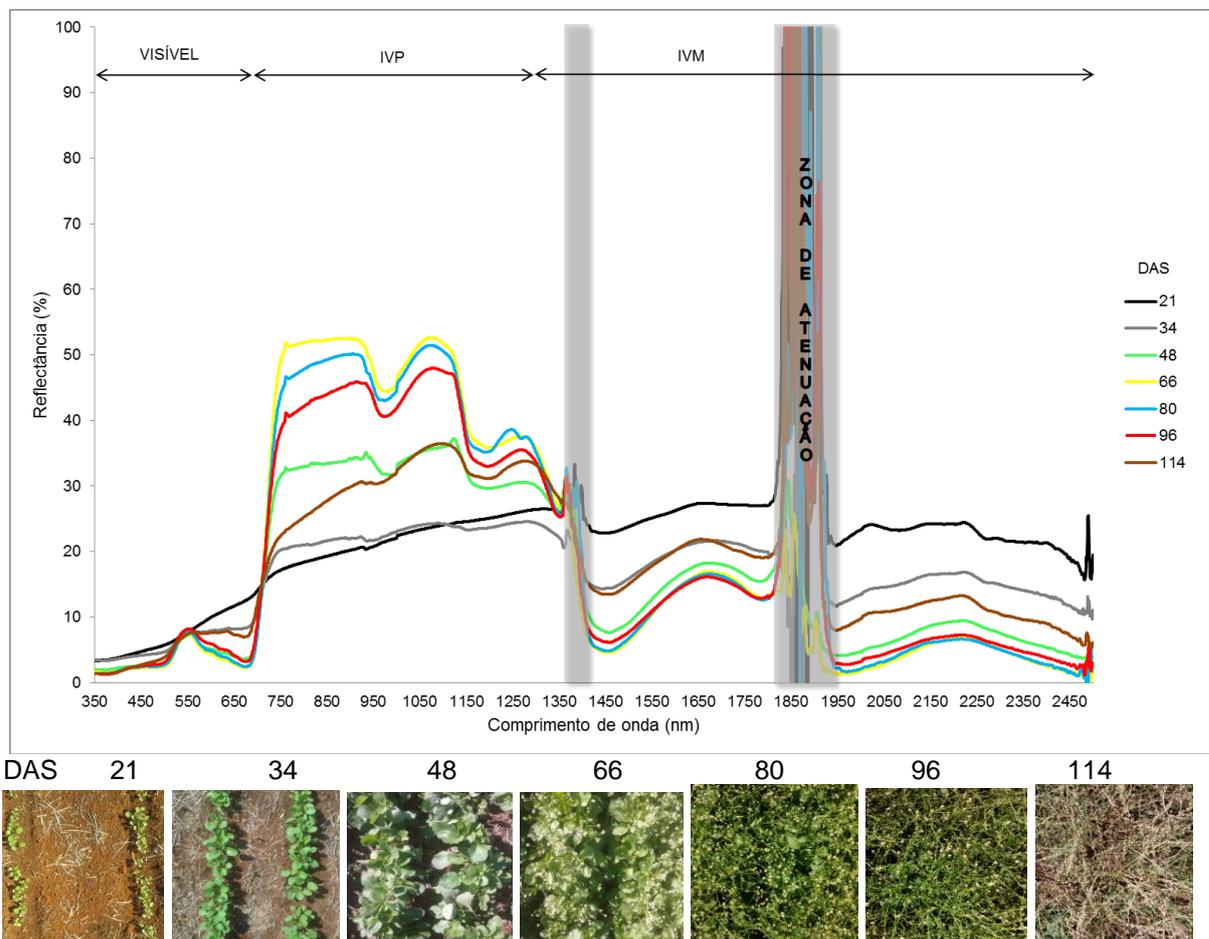


Figura 8 Médias diárias dos padrões espectrais baseados em dias de coletas ao longo do ciclo de desenvolvimento do crambe, safra 2015.

Os padrões espectrais das safras 2014 e 2015 demonstram que nas fases de Plântula e início do Crescimento Vegetativo, as características do solo exposto geram a maior reflexão da região do vermelho de todo o ciclo do crambe; posteriormente ocorre aumento na absorção pelo dossel do crambe nas faixas espectrais do vermelho e IVM para geração de energia empregada no crescimento e no aumento do conteúdo de água na estrutura celular, respectivamente, até atingir as fases fenológicas de pleno Crescimento Vegetativo e Floração. No IVP, há aumento da reflectância nestas fases.

Nas demais fases do ciclo de desenvolvimento, Granação e Maturação, o dossel perde pigmentação, conteúdo de água e inicia a senescência das folhas, contribuindo para a redução da absorção nos comprimentos de ondas do vermelho, redução da reflectância no IVP e aumento da reflectância no IVM.

Aos compararmos com o padrão espectral da canola obtido por Pinto et al. (2017) em estudo conduzido durante duas safras, é possível notar comportamento diferenciado entre as plantas na faixa espectral do visível. A canola apresenta menor reflectância da faixa durante o crescimento vegetativo; na floração aumenta a reflectância; e após este período, durante a fase de amadurecimento (granação), reduz novamente a reflectância da energia eletromagnética nesta faixa espectral. Já para o crambe, a menor reflectância no visível ocorre durante a floração e, após este período, aumenta a reflectância gradativamente – dados estes que podem contribuir para pesquisas futuras que visam a identificação das culturas por sensores orbitais.

3.2 Índices de vegetação

3.2.1 NDVI

3.2.1.1 Análise estatística NDVI

As médias de NDVI de 2014 e 2015 submetidas ao teste de Shapiro-Wilk apresentaram p-valor de 0,64 e 0,25, respectivamente, sendo valores maiores que o nível de significância de 0,05, representando normalidade na distribuição dos dados.

A Tabela 2 apresenta a análise exploratória dos dados NDVI do crambe, safra 2014. Todos caracterizados por baixa dispersão, o menor desvio padrão (DP), de 0,014, foi na coleta no início de ciclo, fases de Plântula e início de Crescimento Vegetativo – 24 DAS – e o maior durante o Crescimento Vegetativo, em 41 DAS (0,040). Segundo Pimentel-Gomes e Garcia (2002), os coeficientes de variação (CV) do NDVI (safra 2014) são classificados de baixa dispersão e alta precisão no experimento.

Tabela 2 Análise exploratória do índice de vegetação NDVI do crambe, safra 2014

Estatísticas	DAS				
	24	41	56	88	104
Mínimo	0,345	0,678	0,818	0,707	0,493
Média	0,365	0,739	0,851	0,725	0,542
Mediana	0,364	0,739	0,855	0,718	0,544
Máximo	0,394	0,802	0,874	0,751	0,574
DP	0,014	0,040	0,016	0,015	0,025
CV (%)	3,82	5,44	1,92	2,04	4,56

DP - Desvio Padrão, CV - Coeficiente de Variação.

A análise exploratória dos dados de NDVI do crambe, safra 2015 está representada na Tabela 3. Baixa dispersão e alta precisão são características dos dados, exceto os valores gerados durante o Crescimento Vegetativo em 34 DAS. O menor desvio padrão e o menor CV foram obtidos na Floração / início da Granação em 80 DAS, 0,005 e 0,58%, respectivamente. Já o maior DP (0,056) e CV de 12,51%, classificado por Pimentel-Gomes e Garcia (2002) como média dispersão, foram encontrados em 34 DAS, na fase de Crescimento Vegetativo.

Tabela 3 Análise exploratória do índice de vegetação NDVI do crambe, safra 2015

Estatísticas	DAS						
	21	34	48	66	80	96	114
Mínimo	0,266	0,328	0,652	0,862	0,847	0,679	0,508
Média	0,287	0,445	0,764	0,869	0,853	0,793	0,587
Mediana	0,286	0,437	0,775	0,866	0,853	0,804	0,593
Máximo	0,313	0,550	0,812	0,878	0,861	0,819	0,681
DP	0,015	0,056	0,044	0,007	0,005	0,038	0,046
CV (%)	5,22	12,51	5,70	0,75	0,58	4,76	7,84

DP - Desvio Padrão, CV - Coeficiente de Variação.

3.2.1.2 Perfil temporal NDVI

A Figura 9 demonstra o perfil temporal de NDVI do crambe nas safras 2014 e 2015. Os índices obtidos no início de ciclo, 24 DAS (2014) e 21 DAS (2015), foram os menores em todo o ciclo da cultura, 0,36 e 0,29, respectivamente. Nas duas safras, as plantas estavam na transição entre as fases de Plântula e início do Crescimento Vegetativo, emitindo as primeiras folhas verdadeiras. As plantas com porte pequeno e o solo exposto contribuem para absorção da energia eletromagnética na faixa do IVP, justificando os menores valores de NDVI (POELKING et al., 2007).

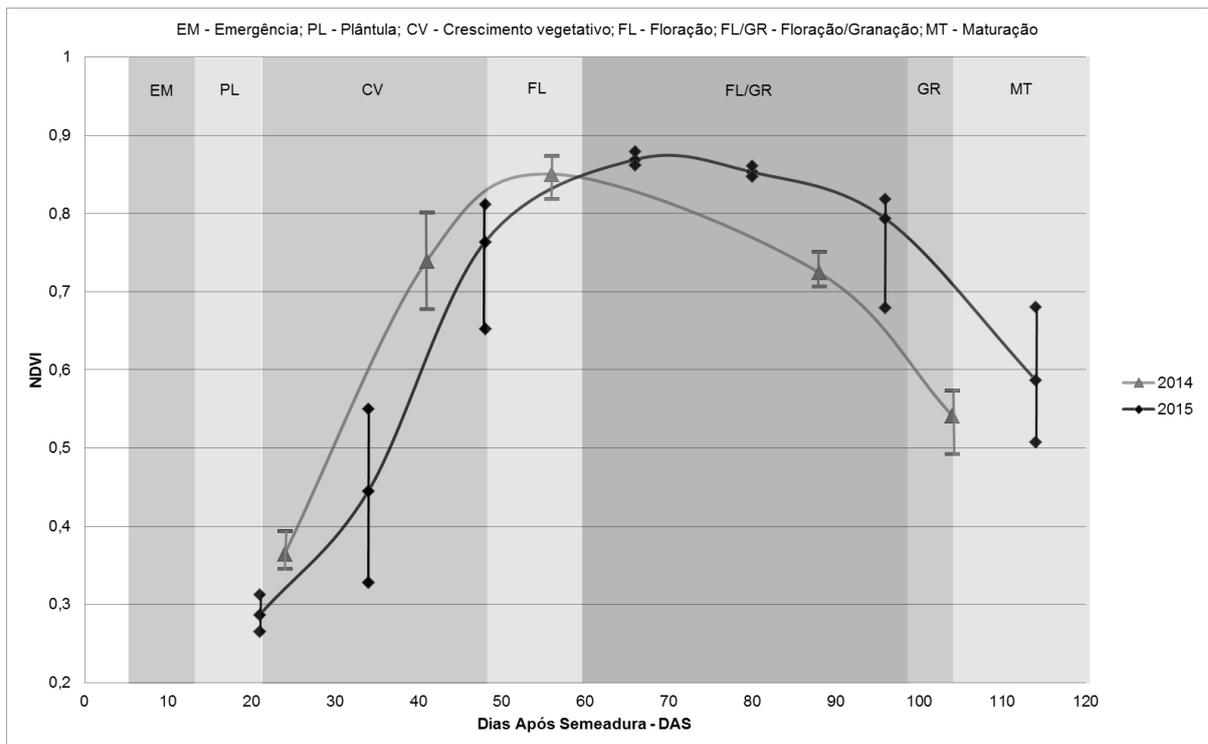


Figura 9 Valores mínimos, máximos e curva composta por médias diárias dos Índices de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) do crambe, safra 2014 e 2015.

Risso et al. (2012), em estudo no Estado do Mato Grosso do Sul visando avaliar o desempenho dos índices NDVI e EVI na distinção de áreas de soja em relação a outras coberturas de solo, encontrou baixos valores de NDVI nas áreas de soja onde havia predominância de restos culturais de safras anteriores e solo exposto. No início de ciclo, as áreas cultivadas apresentam baixas respostas ao NDVI e a ascensão ocorre a partir do desenvolvimento vegetativo das plantas (LEIVAS et al., 2013).

O NDVI apresentou crescimento linear para as duas safras até o pleno Crescimento Vegetativo e início da Floração, quando atingiu os maiores índices do ciclo da cultura, 0,85 (56 DAS – 2014) e 0,87 (66 DAS - 2015). Nestas fases de desenvolvimento, as plantas tendem a apresentar maiores valores para parâmetros biofísicos, como biomassa e índice de área foliar, bem como o NDVI. Estudos demonstram que índices de vegetação como NDVI possuem relação com estes parâmetros biofísicos (KROSS et al., 2015; NGUY-ROBERTSON et al., 2012). O crambe nestas fases apresentou maior biomassa de planta, principalmente pelo tamanho e pelo número de folhas.

Na coleta posterior, valores de NDVI foram reduzidos para 0,72 em 88 DAS (2014) e 0,79 em 96 DAS (2015). Na fase de Granação, as plantas empregam sua energia no enchimento de grãos, iniciando a queda das folhas e, conseqüentemente, o índice de área foliar e o NDVI.

Durante a fase de Maturação, os valores de NDVI obtidos em 104 DAS (2014) e 114 DAS (2015) reduziram: 0,54 e 0,59, respectivamente. Esta redução ocorre devido ao

amarelecimento das folhas provocado pela senescência das culturas (SOUDANI et al., 2012).

Ao compararmos com o perfil temporal do NDVI da canola, é possível verificar a diferença entre as culturas, principalmente por esta exibir dois picos do índice de vegetação durante o ciclo (PINTO et al., 2017).

Em comparativo com perfis de NDVI de cultivares de trigo (*Triticum aestivum*) obtidos em estudo conduzido no mesmo município da pesquisa em 2014, nota-se que as variedades de ciclo médio apresentam uma constante nos maiores valores de NDVI de 51 a 91 DAS (CATTANI et al., 2015), enquanto o crambe em 2015 mantém os valores constantes de 66 a 80 DAS.

Estas características nos perfis temporais das culturas do crambe, canola e trigo podem facilitar a diferenciação das plantas no monitoramento por sensores orbitais em futuras pesquisas, principalmente nas fases fenológicas de pleno crescimento vegetativo e início das fases reprodutivas.

As linhas transversais às curvas representadas na Figura 9 demonstram os valores mínimos e máximos diários de NDVI. Nas duas safras verifica-se maior proximidade entre estes valores e a respectiva média entre as fases de Floração e Granação. Para Zanzarini et al. (2013), onde há elevado índice de área foliar – IAF na cultura, ocorre a saturação do NDVI. Com isso, o índice estabiliza em um patamar, mesmo com aumento da densidade do dossel.

As maiores variações entre valores mínimo, média e máximo de NDVI foram encontrados nas fases de Crescimento Vegetativo e Maturação. O crambe apresenta desuniformidade na maturação das plantas a campo (OLIVEIRA et al., 2014). Isto foi verificado durante a coleta de dados nesta fase fenológica. Apesar da maioria das plantas apresentarem características de final de ciclo (senescência), havia plantas com pigmentação verde e em fase de enchimento de grãos.

3.2.2 SAVI

3.2.2.1 Análise estatística SAVI

As médias SAVI das safras 2014 e 2015 submetidas ao teste de Shapiro-Wilk apresentaram p-valor 0,91 e 0,49, respectivamente; sendo valores maiores que o nível de significância (0,05), representam normalidade dos dados.

Na Tabela 4 está descrita a análise exploratória do índice SAVI – safra 2014. Os dados obtidos nas fases de Plântula / início de Crescimento Vegetativo (24 DAS) e Maturação da cultura (104 DAS) apresentaram coeficiente de variação de baixa dispersão e alta precisão. Os dados coletados nas de Crescimento Vegetativo, Floração e Granação,

representados respectivamente por 41, 56 e 88 DAS, apresentaram média dispersão, conforme classificação proposta por Pimentel-Gomes e Garcia (2002).

Tabela 4 Análise exploratória do índice de vegetação SAVI do crambe, safra 2014

Estatísticas	DAS				
	24	41	56	88	104
Mínimo	0,190	0,415	0,533	0,285	0,374
Média	0,206	0,546	0,662	0,402	0,419
Mediana	0,200	0,517	0,646	0,367	0,419
Máximo	0,236	0,736	0,852	0,596	0,471
DP	0,015	0,109	0,107	0,091	0,028
CV (%)	7,17	19,99	16,18	22,73	6,74

DP - Desvio Padrão, CV - Coeficiente de Variação.

A Tabela 5 corresponde à análise exploratória do SAVI – safra 2015. Dados obtidos em 48, 80 e 114 DAS apresentaram baixa dispersão dos dados. Os demais dias de coleta são classificados por média dispersão de dados (CV: 10 a 20%).

Tabela 5 Análise exploratória do índice de vegetação SAVI do crambe, safra 2015

Estatísticas	DAS						
	21	34	48	66	80	96	114
Mínimo	0,138	0,189	0,432	0,457	0,568	0,384	0,339
Média	0,172	0,260	0,478	0,631	0,615	0,556	0,380
Mediana	0,169	0,259	0,469	0,640	0,609	0,571	0,379
Máximo	0,216	0,310	0,556	0,801	0,672	0,619	0,449
DP	0,023	0,035	0,039	0,079	0,029	0,061	0,030
CV (%)	13,11	13,45	8,13	12,52	4,77	10,93	7,97

DP - Desvio Padrão, CV - Coeficiente de Variação.

3.2.2.2 Perfil temporal SAVI

A Figura 10 demonstra o perfil temporal de SAVI do crambe nas safras 2014 e 2015. Os índices obtidos mostraram comportamento similar ao perfil temporal de NDVI – resultados semelhantes aos obtidos em estudo que comparou valores de SAVI, NDVI e IAF de diferentes coberturas vegetais no Mato Grosso do Sul (BRAZ; ÁGUAS; GARCIA, 2015). Os menores índices de SAVI do crambe foram identificados no início do ciclo da cultura, fases fenológicas de Plântula e início de Crescimento Vegetativo, 0,21 em 24 DAS na safra 2014 e 0,21 em 21 DAS do ano seguinte. Houve aumento nos valores SAVI até o pico do crescimento vegetativo do crambe, atingindo 0,66 (56 DAS – 2014) e 0,63 (66 DAS – 2015). Após esta fase de desenvolvimento, os valores do índice reduziram até atingir a Maturação, com valores de 0,42 em 2014 e 0,38 em 2015. Nos valores mínimos e máximos de SAVI (linhas transversais, Figura 10) é possível verificar aumento da dispersão entre estes valores quando comparados aos obtidos por NDVI, principalmente nas fases de Floração e

Granação, aos 56 DAS em 2014 e 66 e 80 DAS na safra 2015. Tal fato está relacionado à saturação do NDVI sob dossel com elevado IAF e biomassa verde, o que não ocorre com o SAVI (ZANZARINI et al., 2013).

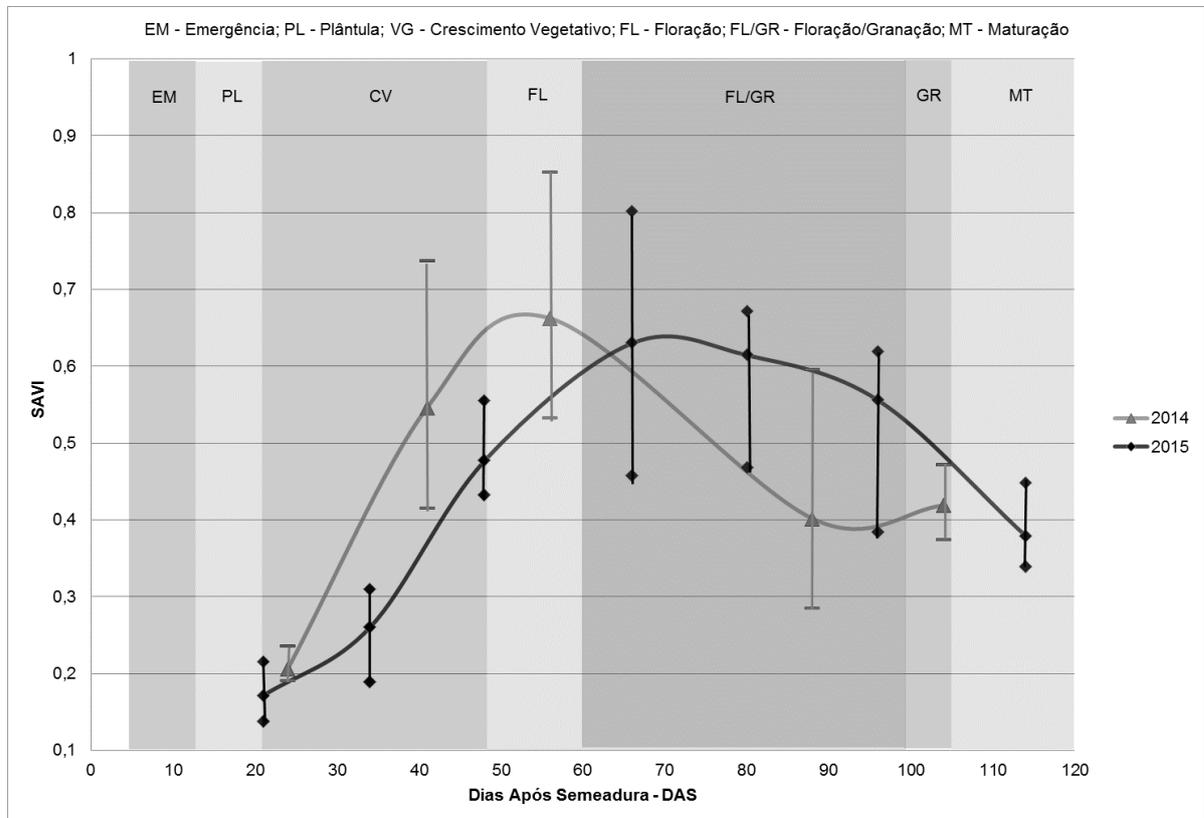


Figura 10 Valores mínimos, máximos e curva composta por médias diárias dos Índices de Vegetação ajustado ao solo – SAVI do crambe, safra 2014 e 2015.

Para Ponzoni, Simabukuro e Kuplich (2012), em condições de solo com média cobertura vegetal, o brilho do solo aumenta os valores dos índices de vegetação. Com a inserção da constante “L”, o SAVI minimizou o efeito do solo nos valores do índice de vegetação. Logo, os resultados foram inferiores aos de NDVI, demonstrando maior proximidade às reais características espectro-temporais do crambe. Estes resultados são similares aos obtidos por Santos et al. (2015), no mapeamento de superfícies de área irrigada por imagens do Landsat-8, e por Almeida et al. (2015) na estimativa de IAF de eucalipto por índices de vegetação.

Os perfis temporais de crambe com NDVI e SAVI demonstram que a cultura tende a apresentar crescimento linear dos índices de vegetação até o pico vegetativo, caracterizado entre o fim da fase fenológica do Crescimento Vegetativo e o início da Floração, momento em que a planta apresenta maior biomassa verde. Após este período, inicia-se a formação e enchimento de grãos, amarelecimento das folhas e senescência, reduzindo os valores de NDVI, SAVI e biomassa do crambe.

4 CONCLUSÕES

Com a utilização do sensor terrestre FieldSpec® 4 Hi-Res e a metodologia utilizada foi possível caracterizar espectro-temporalmente a cultura do crambe, gerando subsídio para delimitação das áreas cultivadas com a cultura por sensores orbitais e distinção das demais plantas anuais cultivadas na safra de inverno.

Os padrões espectro-temporais a partir dos índices de vegetação NDVI e SAVI foram semelhantes, com crescimento linear dos valores até as fases de Crescimento Vegetativo e início da Floração (entre 56 e 66 DAS) e declínio dos índices até atingir a maturação.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. Q.; RIBEIRO, A.; DELGADO, R. C.; RODY, Y. P.; OLIVEIRA, A. S. de; LEITE, F. P. Índice de área foliar de *eucalyptus* estimado por índices de vegetação utilizando imagens TM - LANDSAT 5. **Floresta e Ambiente**, v.22, n.3, p. 368-376, 2015.
- ASDINC. **FieldSpec4 – User manual**. ASD Document 600979. Boulder-CO: PANalytical Company, 2015. 87 p.
- BRAZ, A. M.; ÁGUAS, T. A.; GARCIA, P. H. M. Análise de Índices de Vegetação NDVI e SAVI e Índice de Área Foliar (IAF) para a Comparação da Cobertura Vegetal na Bacia Hidrográfica do Córrego Ribeirãozinho, Município de Selvíria – MS. **Revista Percurso**, v. 7, n. 2, p. 5-22, 2015.
- BREDEMEIER, C.; VARIANI, C.; ALMEIDA, D.; ROSA, A. T. Estimativa do potencial produtivo em trigo utilizando sensor óptico ativo para adubação nitrogenada em taxa variável. **Ciência Rural**, v. 43, n. 7, p. 1147-1154, 2013.
- CATTANI, C. E. V.; MERCANTE, E.; GARCIA, M. R.; KUSMINSKI, D.; OLDONI, L. V. Diferença de padrão espectro-temporal das cultivares de trigo. In: XLIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 2015. São Pedro. **Anais...** São Pedro: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola – SBEA, 2015.
- COUTINHO, A. C.; ESQUERDO, J. C. D. M.; OLIVEIRA, L. S.; LANZA, D. A. Avaliação de metodologia para o mapeamento e monitoramento da agricultura brasileira. In: 4º SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 2012, Bonito. **Anais...** Bonito: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, 2012. p.364-372.
- DATT, B. Remote Sensing of Chlorophyll a, Chlorophyll b, Chlorophyll a+b, and Total Carotenoid Content in Eucalyptus Leaves. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, n. 2, p. 111-121, 1998.
- GENÚ, A. M.; DEMATTÊ, J. A. M. Espectrorradiometria de solos e comparação com sensores orbitais. **Bragantia**, v. 71, n. 1, p. 82-89, 2012.
- HUETE, A.; JUSTICE, C.; LIU, H. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. **Remote Sensing of Environment**, v. 49, n. 3, p. 224-234, 1994.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.
- IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná – Classificação climática**. Londrina-PR: Instituto Agrônômico do Paraná, 2011.
- JASPER S. P.; BIAGGIONI, M. A. M.; SILVA, P. R. A.; SEKI, A. S.; BUENO, O. C. Análise energética da cultura do crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) produzida em plantio direto. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.3, p.395-403, 2010.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres**. 2. ed. Tradução de José Carlos Neves Epiphanyo et al. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

KNIGHTS, S. **Crambe**: A North Dakotan case study. Disponível em: <<http://www.regional.org.au/au/asa/2003/c/11/knights.htm>>. Acesso em: 10 set. 2016.

KROSS, A.; MCNAIRN, H.; LAPEN, D.; SUNOHARA, M.; CHAMPAGNE, C. Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 34, n. 1, p. 235-248, 2015.

LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; TEIXEIRA, A. H. de C.; VICTORIA, D. de C.; TORRESAN, F. E.; BOLFE, E. L. **Dinâmica espaçotemporal do NDVI em mesorregiões produtoras de milho segunda safra**. Campinas-SP: Embrapa Monitoramento por Satélites, 2013. 20 p.

LI, Y.; ZHOU, Q.; ZHOU, J.; ZHANG, G.; CHEN, C.; WANG, J. Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. **Field Crops Research**, v. 157, p. 111-123, 2014.

LOHMANN, M.; DEPPE, F. SIMÕES, K.; MERCURI, E. G. F. Monitoramento da Evolução Temporal da Cultura da Soja no Estado do Paraná utilizando Imagens TERRA/MODIS. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 2009, Natal. **Anais...** Natal: INPE, 2009. p. 263-269.

MARTINS, G. D.; TRINDADE GALO, M. L. B. In situ spectral characterization of sugar cane infected by nematodes and *Migdolus fryanus*. **Boletim de Ciências Geodesicas**, v. 21, n. 4, p. 783-796, 2015.

MOERS, E. M. **Ocorrência de doenças na cultura do crambe (*Crambe Hochst abyssinica*) cultivado na região oeste do Paraná e efeito de *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* na produção da cultura**. 2012. 74f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura). Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Cascavel, PR, 2012.

MONTEIRO, P.F.C.; ANGULO FILHO, R.; XAVIER, A.C.; MONTEIRO, R.O.C. Índices de Vegetação Simulados de Diferentes Sensores na Estimativa das Variáveis Biofísicas do Feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 4, p. 433-441, 2013.

MOTOMIYA, A. V. A.; VALENTE, I. M. Q.; MOLIN, J. P.; MOTOMIYA, W. R.; BISCARO, G. A.; JORDAN, R. A. Índice de Vegetação no Algodoeiro sob Diferentes Doses de Nitrogênio e Regulador de Crescimento. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 1, p. 169-178, 2014.

MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering** v. 114, n. 4, p. 358-371, 2013.

NGUY-ROBERTSON, A.; GITELSON, A.; PENG, Y.; VIÑA, A.; ARKEBAUER, T.; RUNDQUIST, D. Green leaf area index estimation in maize and soybean: combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. **Agronomy Journal**, v. 104, n. 5, p. 1336-1347, 2012.

OLIVEIRA, M. B. de; DAVID, A. M. S. de S.; AMARO, H. T. R.; ASSIS, M. de O.; RODRIGUES, B. R. A.; ASPIAZÚ, I.; CARVALHO, A. B. de. Épocas de Colheita e Qualidade Fisiológica de Sementes de Crambe. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 35, n. 4, p. 1785-1792, 2014.

OLIVEIRA, R. C. de; AGUIAR, C. G. de; VIECELLI, C. A.; PRIMIERI, C.; BARTH, E. F.; BLEIL JUNIOR, H. G.; SANDERSON, K.; ANDRADE, M. A. de A.; VIANA, O. H.; SANTOS, R. F.; PARIZOTTO, R. R. **Boletim Técnico - Cultura do Crambe**. 1. ed. Cascavel/PR: Assoeste, 2013. 70 p.

OLIVEIRA, R. C. de; REIS, A. C. C. S.; AGUIAR, C. G. de; VIECELLI, C. A.; PRIMEIRI, C.; TOMASI, G. A.; BLEIL JUNIOR, H. G.; ANDRADE, M. A. A.; VIANA, O. H. **Agroindustrialização do crambe**. 2. ed. Cascavel/PR: Assoeste, 2015.

PAPA, R. A. **Comportamento espectro-temporal da cultura do feijão, por meio de dados obtidos por espectroradiometria, câmera digital e imagem aster**. 2009. 132 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias). Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Universidade de Brasília - UNB. Brasília, 2009.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais - Exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

PINTO, D. G.; FONTANA, D. C.; DALMAGO, G. A.; CUNHA, G. R.; FOCHESSATO, E.; VICARI, M. B.; GOUVÉA, J. A.; SANTI, A. Temporal dynamics of spectral reflectance and vegetation indices during canola crop cycle in Southern Brazil. **Ciência Rural**, v. 47, n. 1, 2017.

PITOL, C.; BROCH, D. L.; ROSCOE, R. **Tecnologia e Produção Crambe 2010**. 1. ed. Maracaju-MS: Fundação MS, 2010. 60 p.

POELKING, E. L.; LAUERMANN, A.; DALMOLIN, R. Imagens CBERS na geração de NDVI no estudo da dinâmica da vegetação em período de estresse hídrico. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 4145-4150.

PONZONI, F. J.; SIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação – atualizada e ampliada**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2012. 176 p.

RISSO, J.; RIZZI, R.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M.; SHIMABUKURO, Y. E.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, R. D. V. Índices de vegetação Modis aplicados na discriminação de áreas de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1317-1326, 2012.

ROUSE, J. W.; HASS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite Symposium, 3., 1974, Washington. **Proceedings...** Washington: NASA, 1974. p.309-317.

SANTOS, H. G.; CARVALHO JUNIOR, W.; DART, R. O.; ÁGLIO, M. L. D.; SOUSA, J. S.; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. S.; OLIVEIRA, A. P. **O novo mapa de solos do Brasil**: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

SANTOS, J. I.; SILVA, T. R. B.; ROGERIO, F.; SANTOS, R. F.; SECCO, D. Yield response in crambe to potassium fertilizer. **Industrial Crops and Products**, v. 43, n. 1, p. 297-300, 2013.

SANTOS, J. É. O.; NICOLETE, D. A. P.; FILGUEIRAS, R.; LEDA, V. C.; ZIMBACK, C. R. L. Imagens do landsat- 8 no mapeamento de superfícies em área irrigada. **Irriga**, Edição Especial, p. 30-36, 2015.

SILVA, T. R. B.; REIS, A. C. S.; NOLLA, A.; ARIEIRA, C. R. D.; SILVA, C. A. T.; GOUVEIA, B. T.; MASCARELLO, A. C.; CARRARO, T. V.; ARIEIRA, J. O. Nitrogen top dressing application and growing season of crambe cultivated on two crop year. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v.7, n.3&4, p.1463-1466, 2013.

SOUDANI, K.; DELPIERRE, N.; PONTAILLER, J. Y.; AUBINET, M.; BONAL, D.; CAQUET,

B.; GRANDCOURT, A.; BURBAN, B.; FLECHARD, C.; GUYON, D.; GRANIER, A.; GROSS, P.; HEINESH, B.; LONGDOZ, B.; LOUSTAU, D.; MOUREAX, C.; OURCIVAL, J. M.; RAMBAL, S.; SAINT ANDRÉ, L.; DUFRÊNE, E. Ground-based Network of NDVI measurements for tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biomes. **Remote Sensing of Environment**, v. 123, p. 234-245, 2012.

SOUSA JUNIOR, J. G. A.; DEMATTÊ, J. A. M.; GENÚ, A. M. Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestre e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2008, v. 32, p. 727-738.

SOUZA, R. S.; CHAVES, L. H. G.; FERNANDES, J. D.; VASCONCELOS, A. C. F. Growth and Production of Crambe Submitted to Doses of Nitrogen and Potassium. **American Journal of Plant Sciences**, v. 7, n. 7, p. 8-16, 2016.

VIANA, O. H.; SANTOS, R. F.; OLIVEIRA, R. C.; SECCO, D.; SOUZA, S. N. M.; TOKURA, L. K.; SILVA, T. R. B.; GURGACZ, F. Crambe (*Crambe abyssinica* H.) development and productivity under different sowing densities. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, n. 8, p. 690-695, 2015.

VIANA, O. H. **Cultivo de crambe na região oeste do Paraná**. 2013. 60 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura). Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Cascavel, PR, 2013.

VIÑA, A.; GITELSON, A. A.; NGUY-ROBERTSON, A.L.; PENG Y. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 12, p. 3468-3478, 2011.

YAO, F.; TANG, Y.; WANG, P.; ZHANG, J. Estimation of maize yield by using a process-based model and remote sensing data in the Northeast China Plain. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 87-88, p. 142-152, 2015.

ZANZARINI, F. V.; PISSARA, T. C.; BRANDÃO, F. J. C.; TEIXEIRA, D. D. B. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat / ETM + com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 6, p. 608-614, 2013.

ARTIGO 2: POTENCIAL DE SENSORES ESPECTRAIS TERRESTRES NA ESTIMATIVA DE RENDIMENTO DO CRAMBE (*Crambe abyssinica* H.)

RESUMO

O crambe demonstra-se importante para a matriz energética brasileira, devido ao potencial produtivo de óleo. Entretanto, há uma carência de estudos que analisem o rendimento de grãos a partir de informações da planta coletadas de forma não destrutiva, como por meio de sensoriamento remoto espectral. Neste sentido, a presente pesquisa tem por objetivo avaliar a relação entre índices de vegetação, obtidos em diferentes estágios fenológicos por sensores espectrais terrestres, com o rendimento de grãos da cultura. O estudo foi conduzido na safra de inverno de 2015 em área agrícola experimental no município de Cascavel, Paraná. Foram coletadas informações espectrais de doze pontos aleatórios, durante todas as fases fenológicas do crambe, separando os dados coletados pelas faixas espectrais do vermelho, infravermelho próximo e médio, e assim gerados os índices de vegetação NDVI, SAVI e NDMI. Os dados de sensoriamento remoto terrestre foram correlacionados com rendimento de grãos, elaborados e avaliados os modelos de regressões lineares. O NDMI 66 DAS, no início da floração, apresentou correlação negativa com rendimento de grãos (R^2_{adj} : 0,49; RMSE: 134,80 kg ha⁻¹). A faixa espectral do vermelho (648 a 672 nm) em 66 DAS apresentou correlação linear positiva com rendimento de grãos (R^2_{adj} : 0,36; RMSE: 151,38 kg ha⁻¹). As flores presentes no dossel da planta, na floração, contribuíram para o aumento da reflectância na faixa espectral do vermelho e infravermelho médio. A capacidade explicativa do rendimento com os modelos gerados foi reduzida devido às condições climáticas adversas ocorridas no período, como precipitação excessiva e ventos na floração, granação e maturação.

PALAVRAS-CHAVE: sensoriamento remoto; índices de vegetação; correlação; estimativa de safra.

ARTICLE 2: MULTI-SPECTRAL REMOTE SENSING POTENTIAL TO ESTIMATE THE YIELD OF A CRAMBE (*Crambe abyssinica* H.) CROP

ABSTRACT

Crambe is a highly important crop for the Brazilian energy matrix due to its potential for oil production. However, there is a need for studies focusing on grain yield based on information gathered in a non-destructive manner, such as by using remote sensing. Thus, the objective of this research is to evaluate the relationship between vegetation indices obtained in different phenological phases by multi-spectral sensors and crambe grain yield. The study was conducted in the winter crop season in 2015 in an experimental agricultural area in the city of Cascavel, state of Paraná. Spectral information from twelve random spots were gathered during all phenological phases of the crambe crop. The data collected were separated according to their spectral region (red, near- and mid-infrared). Then, the vegetation indices NDVI, SAVI, and NDMI were generated. Remote sensing data were correlated with grain yield, and linear regression models were elaborated and evaluated. At 66 days after sowing, in the beginning of the flowering phase, the NDMI presented a negative correlation with grain yield (R^2_{adj} : 0,49; RMSE: 134.80 kg ha⁻¹). The red-light region (648 to 672 nm) at 66 days after sowing presented a positive linear correlation with grain yield (R^2_{adj} : 0.36; RMSE: 151.38 kg ha⁻¹). The flowers in the canopy of the plant during the flowering phase contributed to the increase of the reflectance in the red-light and mid-infrared regions. The explanatory capacity of the yield with the generated models was reduced due to

adverse climatic conditions in the period, such as excessive precipitation and wind during the flowering, granulation, and maturation phases.

KEYWORDS: remote sensing; vegetation indices; correlation; crop estimation.

1 INTRODUÇÃO

Crambe abyssinica H. pertence às *Brassicaceae*, mesma família da canola (*Brassica napus* L.) e do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.); é uma planta rústica, adaptável a diversas condições edafoclimáticas. Com elevado teor de óleo nas sementes, destaca-se como importante matéria-prima na produção de biodiesel, produtos químicos e fluídos isolantes para o setor elétrico. Da sementeira à colheita, é formada pelas fases fenológicas de emergência, plântula, crescimento vegetativo, floração, granação e maturação. Seu ciclo é precoce, variando de 78 a 125 dias, dependendo da época de sementeira (PITOL; BROCH; ROSCOE, 2010; SANTOS et al., 2016). Devido ao reduzido tempo de cultivo no país, há poucos estudos relacionados às questões agrônômicas e ao comportamento espectro-temporal da planta (BASSEGIO et al., 2016; SOUZA; CHAVES, 2016).

O sensoriamento remoto (SR) é uma importante tecnologia empregada no monitoramento do comportamento espectro-temporal de culturas agrícolas. Proporciona informações espectrais que possibilitam avaliar a sanidade (MEWES et al., 2008) e a biomassa, assim como estimar o rendimento de grãos de diversas culturas a partir de sensores orbitais, aéreos e terrestres (MULLA, 2013).

Para Zheng et al. (2016), o SR terrestre, composto por sensores ativos e passivos, é mais vantajoso devido à flexibilidade das resoluções temporal e espectral quando comparado ao SR por satélites.

Estudos conduzidos com espectrorradiômetros demonstram a capacidade dos sensores no monitoramento das fases fenológicas de culturas anuais, permitindo a avaliação em faixas espectrais distintas, a geração de índices de vegetação e a estimativa de rendimento de grãos (BATTAY; MAHMOUDI, 2016; FOSTER; KAKANI; MOSALI, 2017; LI, et al., 2010).

As reflectâncias nas faixas do vermelho (600 a 700 nm) e infravermelho próximo (700 – 1300 nm) são variáveis de acordo com o teor de clorofila e a estrutura celular presente nos dosséis das plantas, sendo importantes comprimentos de ondas no monitoramento das culturas e base para formular índices de vegetação (PONZONI; SIMABUKURO; KUPLICH, 2012). Outra faixa espectral que tem sido utilizada em pesquisas e demonstra resultados satisfatórios na estimativa de conteúdo de clorofila foliar é a região da borda vermelha (LI et al., 2017).

Diversos índices de vegetação foram propostos utilizando estes comprimentos de onda, dentre estes o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), baseado em dados de reflectância das faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo e variável

de -1 a 1 (ROUSE et al., 1974), sendo dos mais empregados devido à capacidade de mensurar parâmetros agronômicos (RISSINI et al., 2015). No entanto, em determinado estágio de desenvolvimento das plantas, o NDVI satura e estabiliza, mesmo com o aumento da biomassa do dossel (ZANZARINI et al., 2013). Para minimizar a saturação, Huete (1988) propôs a adição de um coeficiente constante (L) na fórmula de NDVI por meio do Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI).

Outro índice comumente utilizado para o acompanhamento da dinâmica agrícola é o NDMI (Índice de Umidade de Diferença Normalizada). Este índice de vegetação utiliza dados espectrais do infravermelho e permite determinar o teor de água no dossel, auxiliando na avaliação de parâmetros biofísicos da vegetação (JIN; SADER, 2005; WANG et al., 2013).

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a relação entre índices de vegetação, obtidos em diferentes estágios fenológicos por sensores espectrais terrestres, com o rendimento de grãos da cultura do crambe.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Unidade experimental

O experimento foi conduzido em quatro hectares na Fazenda Escola do Centro Universitário FAG, próximo às coordenadas UTM 245930.23 m E; 7239937.52 m S, fuso 22J e altitude de 700 m, no município de Cascavel, PR, Brasil.

O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho distroférico (LVdf1) e clima, segundo classificação Köppen, Cfa, temperatura média no mês mais frio inferior a 18 °C e temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C, concentração de precipitação nos meses de verão, geadas pouco frequentes e sem estação seca definida (SANTOS et al., 2011).

No final do mês de abril de 2015, foi semeada a cultivar FMS Brilhante em sucessão à cultura do milho e soja, no sistema de plantio direto por meio do conjunto semeadora/adubadora de 9 linhas, com espaçamento entre linhas de 0,45 m e densidade de 12 kg ha⁻¹ de sementes (36 plantas por metro). A correção do solo ocorreu na implantação das culturas antecessoras visando atender às devidas exigências nutricionais.

2.2 Amostras experimentais

O experimento foi conduzido com delineamento inteiramente casualizado (DIC). Na unidade experimental foram selecionados doze pontos, definidos como amostras experimentais, para coleta das variáveis informações espectrais e rendimento de grãos (Figura 1). As coordenadas das amostras foram extraídas a partir de software de geoprocessamento, inseridas no receptor GNSS Trimble Juno SB e demarcadas a campo com bandeiras empregadas em experimentos agrônômicos.

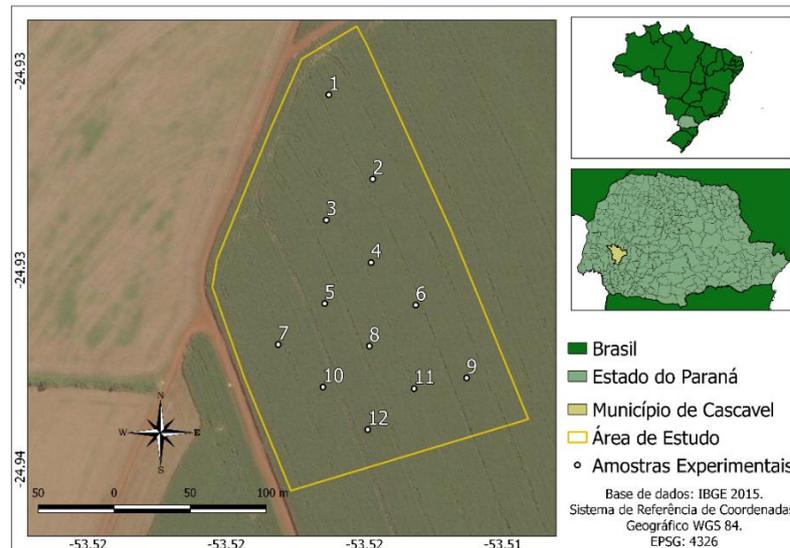


Figura 1 Amostras experimentais na área de crambe.
2.3 Coleta dos dados espectrais

Os dados espectrais foram coletados em sete incursões a campo utilizando três formas de captura, sensor FieldSpec® 4 Hi-Res (FS4) no modo passivo e no modo ativo e o sensor ativo Greenseeker® 505 Handheld (GS). Em cada amostra experimental foram realizadas quatro repetições das leituras espectrais.

As coletas foram realizadas em resolução temporal entre 13 e 18 dias, visando a coleta das informações espectrais em todas as fases fenológicas do crambe (Tabela 1). Também foram realizados registros fotográficos do estado do dossel de plantas nos dias e horários das coletas. As medições foram entre 10:00 h e 12:00 h, em dias com céu claro, visando a máxima radiação solar.

Tabela 1 Dias após semeadura – DAS e fases fenológicas correspondentes às coletas de informações espectrais

DAS	Fase fenológica correspondente	Registro fotográfico	DAS	Fase fenológica correspondente	Registro fotográfico
21	Plântula / Crescimento Vegetativo		80	Floração/ Granação	
34	Crescimento Vegetativo		96	Granação	

48	Crescimento Vegetativo		114	Maturação	
66	Floração				

DAS – Dias Após Semeadura

2.3.1 Sensor FieldSpec® 4 Hi-Res

O sensor FS4 opera entre comprimentos de onda (λ) de 350 nm a 2500 nm, no modo passivo. Este foi otimizado e referenciado a cada 20 minutos em superfície branca, tipo Spectralon®, definida como reflectância máxima (1 ou 100% de reflectância) (ASD INC, 2015).

As coletas foram realizadas a 2,00 m de altura do solo e área sensoriada de 0,60 m² até o recobrimento total do dossel pelas plantas (48 DAS); a partir de 66 DAS as coletas foram realizadas a 0,80 m de altura do dossel de plantas, totalizando área sensoriada de 0,10 m²; informações capturadas de forma pontual e sensor posicionado nas entrelinhas de semeadura com campo de visão de 25° (Figura 2).



Figura 2 Posicionamento do sensor FieldSpec® 4 Hi-Res, modo passivo para coleta de informações espectrais.

No modo ativo, foi realizado aleatoriamente o arranque das folhas do dossel em cada amostra experimental. Para as leituras das informações espectrais utilizou-se o acessório Leaf Clip (Figura 3). Inicialmente, o sensor foi otimizado e referenciado em superfície branca, tipo Spectralon®, definida como reflectância máxima (1 ou 100% de reflectância). As coletas ocorreram em 34, 48 e 66 DAS; fora deste período, as folhas não tinham tamanho suficiente para cobrir a superfície de leitura do sensor.

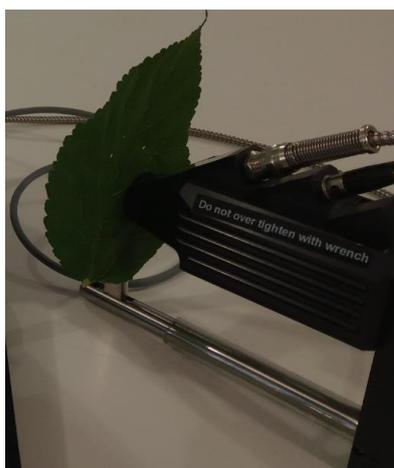


Figura 3 Exemplo de leitura de folha com sensor FieldSpec® 4 Hi-Res, modo ativo.

2.3.2 Sensor Greenseeker® 505 Handheld Sensor

O sensor ativo emite comprimentos de ondas na faixa do vermelho ($660 \text{ nm} \pm 25 \text{ nm}$) e infravermelho próximo ($770 \text{ nm} \pm 25 \text{ nm}$) (NTECH INDUSTRIES, 2007). O instrumento foi posicionado sobre a linha de semeadura de crambe, a 0,80 m do dossel, pressionado o gatilho e percorrido a linha por aproximadamente 15 segundos, no sistema de varredura, gerando em torno de 120 dados de NDVI divididos em 4 repetições por amostra experimental (Figura 4).



Figura 4 Posicionamento do sensor Greenseeker® 505 Handheld para coleta de informações espectrais.

2.4 Composição das faixas espectrais e geração de Índices de vegetação

As informações espectrais obtidas por meio do sensor FS4 foram tabeladas por datas de coletas, separadas em faixas de reflectância para composição de faixas espectrais e índices de vegetação para posteriores testes de correlação (Tabela 2).

Tabela 2 Faixas espectrais e índices de vegetação gerados

Faixas espectrais / índices de vegetação	Fórmulas	Referências
Banda do Vermelho – Red	R648 a 672	
Banda do Infravermelho próximo – IVP	R758 a 782	
Banda da borda vermelha – Red Edge	R680 a 760	
Índice de vegetação por diferença normalizada –NDVI	$(\rho_{IVP} - \rho_V) / (\rho_{IVP} + \rho_V)$	Rouse et al. (1974)
Índice de Vegetação ajustado ao solo – SAVI	$1.5 \times (\rho_{IVP} - \rho_V) / (\rho_{IVP} + \rho_V + 0.5)$	Huete (1988)
Índice de umidade da diferença normalizada – NDMI	$((R_{760 \text{ a } 900}) - (R_{1550 \text{ a } 1750})) / ((R_{760 \text{ a } 900}) + (R_{1550 \text{ a } 1750}))$	Jin e Sader (2005)

R - reflectância espectral; ρ_{IVP} - banda do Infravermelho próximo; ρ_V - banda do vermelho.

2.5 Dados climatológicos e Rendimento de grãos

Os dados relacionados às temperaturas mínimas e máximas diárias foram obtidas junto ao Centro Universitário FAG e ao Instituto Agrônomo do Paraná – IAPAR. As precipitações e a velocidade dos ventos diárias foram obtidas em conjunto com o Centro Universitário FAG.

Para o cálculo de rendimento de grãos, ao atingir a maturação da planta, foram delimitados 1 m² em cada amostra experimental, utilizando armação de madeira para demarcar o local. Todas as plantas localizadas dentro da estrutura foram colhidas e armazenadas em embalagens de polipropileno. Os grãos foram removidos e limpos com auxílio de peneiras de 2 mm. As amostras de grãos foram secas em estufa a 110 °C por 24 h para determinação da umidade. Logo após, foram pesadas em balança analítica de precisão para obtenção de rendimento de grãos em kg ha⁻¹, a 9% de umidade (BRASIL, 2009).

2.6 Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas no software Action Stat Pro. Inicialmente, avaliaram-se as correlações entre informações espectrais (faixas espectrais / índices de vegetação) e rendimento de grãos por meio do coeficiente de correlação por postos de Spearman (r_s). Aplicou-se o teste de hipóteses pelo teste bilateral a nível de significância de 5% e foram construídos os modelos de regressão linear para os fatores com correlação.

Na sequência, os modelos foram testados por meio dos p-valores obtidos na análise de variância (ANOVA), coeficiente de determinação (R^2) e coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}). O desempenho do modelo foi analisado pelo método do erro quadrático médio (RMSE) (Equação 1) e o índice refinado de Wilmott (d_r) (Equação 2).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (O - E)^2} \quad \text{Eq.(1)}$$

$$d_r = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |E - O|}{2 \sum_{i=1}^n (|O - \bar{O}|)} \quad \text{Eq.(2)}$$

Onde:

n - número de amostras experimentais;

O - valores de rendimento de grãos coletados a campo;

E - valores estimados pelo modelo;

\bar{O} - valor médio de rendimento de grãos coletado a campo.

O Índice d_r é variável de -1 a 1. Valores próximos a 1 indicam uma boa concordância entre valores observados e preditos; d_r próximo ou menor a 0 representam discordância entre os valores (WILLMOTT et al., 2012).

Os resíduos dos modelos foram avaliados por meio do teste de normalidade de Shapiro-Wilk, homocedasticidade pelo teste de Breusch-Pagan e teste de Independência por Durbin-Watson.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O rendimento médio obtido na unidade experimental foi de aproximadamente 1250 kg ha^{-1} , dados inferiores aos obtidos por Viana et al. (2015) em estudo conduzido em 2012 na mesma área experimental. Ao testar densidades de semeadura, os autores atingiram rendimento mínimo de 1706 kg ha^{-1} com 24 kg ha^{-1} de sementes e rendimento máximo de 2118 kg ha^{-1} no tratamento com densidade de semeadura de 8 kg ha^{-1} . No entanto, durante a pesquisa desenvolvida pelos autores, a precipitação foi de 444,90 mm distribuída principalmente da semeadura ao início da floração do crambe, valores inferiores aos obtidos na presente pesquisa (827 mm).

Oliveira et al. (2015), conduzindo a cultura no mesmo local em abril de 2014, com densidade de semeadura de 12 kg ha^{-1} e sem adubação de base, obtiveram rendimento médio de 1428 kg ha^{-1} em ciclo onde ocorreu 744 mm de precipitação.

Vários são os fatores que contribuem para a redução no rendimento de grãos no presente estudo. Dentre estes, destaca-se a elevada precipitação (444 mm) durante as fases de florescimento e granação (49 a 104 DAS) (Figura 5). A precipitação ideal é variável entre 200 e 250 mm até pleno florescimento, e o excesso de chuva na floração contribui para a ocorrência de doenças nas plantas e debulha de grãos, interferindo na produção do crambe (PITOL; BROCH; ROSCOE, 2010).

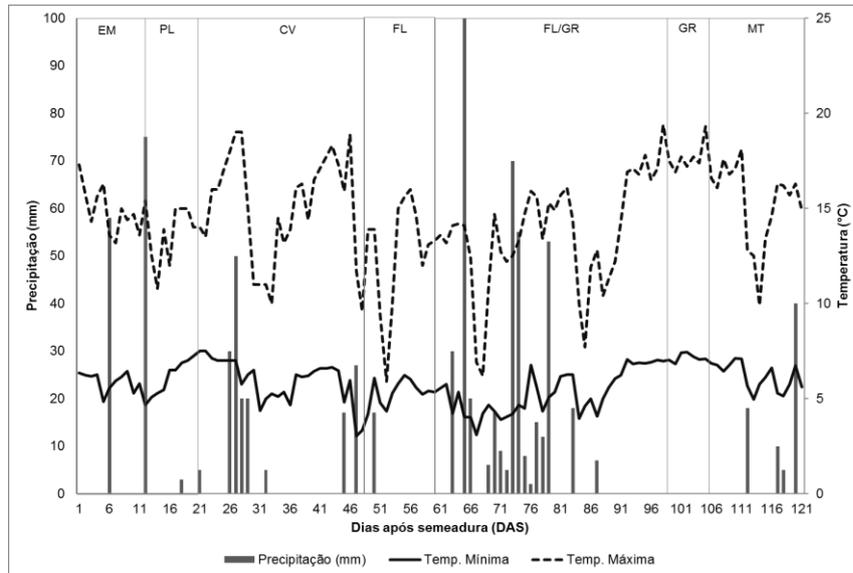


Figura 5 Dados climatológicos durante o ciclo de desenvolvimento do crambe.

Durante as incursões a campo, notaram-se queda de flores e debulha de grãos causados pela precipitação excessiva em dias concentrados, como, por exemplo, aos 72, 73 e 78 DAS, com 70, 55 e 53 mm de chuva, respectivamente (Figura 5) e por ventos elevados ocorridos nas fases de floração/granação; granação e maturação (Figura 6).

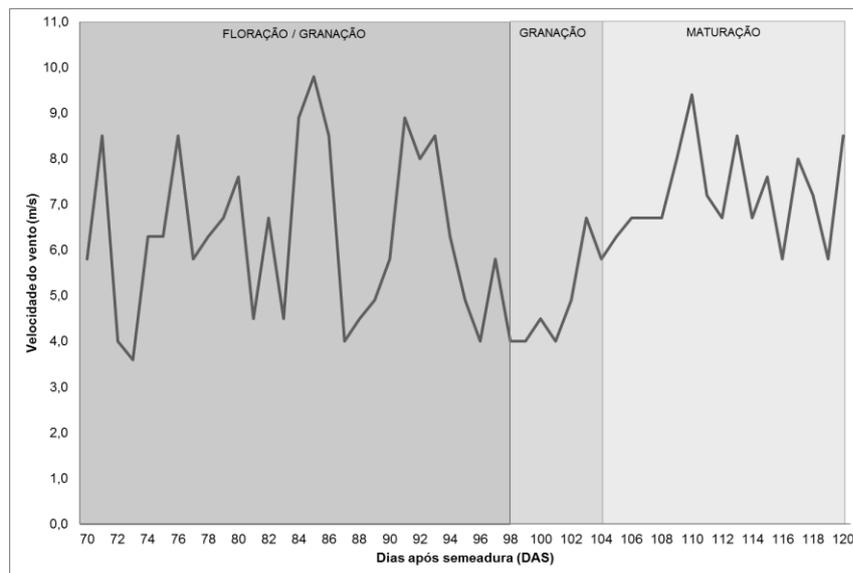


Figura 6 Velocidade diária máxima dos ventos nas fases de floração/granação; granação e maturação do crambe.

A Figura 5 descreve as temperaturas mínimas e máximas diárias durante o ciclo de desenvolvimento, o que permite o cálculo do somatório de graus-dia, índice que expressa a necessidade biológica da planta para completar seu desenvolvimento. Este índice, segundo Pilau et al. (2011), é calculado a partir da temperatura basal de 9,5 °C; valores acima disso ativam o crescimento da planta. Da emergência à maturação, o crambe alcançou somatório de 1066,6 °C, suficiente para seu desenvolvimento (KMEC et al., 1998).

Durante a granação, os ventos atingiram velocidades máximas registradas de 9,8 m/s em 75 DAS, e 9,4 m/s em 100 DAS. Na maturação, a máxima registrada foi de 8,9 m/s em 116 DAS (Figura 6). O crambe apresenta dossel denso devido ao número de ramificações e grãos presentes nas plantas. Para Cleugh et al. (1998), a força do vento pode danificar culturas que formam dosséis com estas características.

O crambe é uma cultura que, ao final do ciclo, seca rapidamente e os ventos fortes neste momento podem levar a grandes perdas no rendimento (GLASER, 1996). Pitol (2008) destaca que, para evitar esta situação, a colheita é recomendada logo após a maturação. Em complemento, Portella e Tomm (2007) citam que a partir da maturação da canola, cultura com características morfológicas similares ao crambe, a ação dos ventos contribui para a debulha de grãos e tombamento de plantas, afetando o rendimento da cultura.

Na Tabela 3 estão apresentados os coeficientes de correlação por postos de Serman (r_s) entre dados espectrais (faixas espectrais e índices de vegetação – IVs) nas fases de desenvolvimento e rendimento de grãos de crambe. Os dados espectrais gerados pelo sensor Greenseeker (GS) não apresentaram correlação ordinal significativa com o rendimento de grãos.

Tabela 3 Coeficiente de correlação por postos de Serman (r_s) entre dados espectrais (faixas espectrais e índices de vegetação – IVs) nas fases de desenvolvimento e rendimento de grãos de crambe

Sensores	Faixas espectrais/ IVs	DAS							
		21	34	48	66	80	96	114	∑ 48 e 66
GS	NDVI	0,03	0,03	0,22	0,34	0,13	-0,08	0,05	0,22
	SAVI	-0,01	-0,03	0,26	-0,12	0,07	0,03	-0,07	0,30
	Red	-0,01	0,10	-0,04	-0,59	-0,06	-0,01	-0,41	-0,30
	IVP	0,00	-0,18	0,24	-0,15	0,02	0,03	-0,02	0,28
FS4 Passivo	NDVI	-0,12	0,05	-0,09	-0,47	-0,36	-0,48	-0,67*	-0,33
	SAVI	0,52	-0,21	0,22	0,49	-0,33	-0,55	-0,65*	0,25
	NDMI	-0,14	-0,15	-0,37	-0,77*	0,20	-0,52	-0,59	0,45
	Red	0,37	-0,08	0,50	0,85*	0,07	0,36	0,66*	0,83*
	Red Edge	0,54	0,21	0,47	0,75*	-0,41	-0,39	0,08	0,63
	IVP	0,59	-0,20	0,42	0,53	-0,38	-0,50	-0,38	0,56
FS4 Ativo	NDVI		-0,48	-0,18	0,22				0,21
	NDMI		-0,21	0,13	0,54				0,56
	Red		0,21	-0,25	-0,21				-0,42
	Red Edge		-0,20	-0,16	-0,04				-0,10
	IVP		-0,34	-0,46	0,11				-0,27

*Correlação ordinal significativa entre as variáveis; DAS - Dias Após Semeadura; GS - Greenseeker®; FS4 - FieldSpec® 4.

Os índices NDVI 114 DAS; SAVI 114 DAS; NDMI 66 DAS e informações espectrais da banda do vermelho (Red) (66, 114 e o somatório (∑) 48 e 66 DAS) e Red Edge 66 DAS do sensor FS4 Passivo apresentaram correlação com rendimento de grãos (Tabela 3). A

variação dos resultados obtidos com os sensores GS e FS4 no modo passivo podem estar associadas às diferentes características dos sensores e às metodologias de aquisição de dados (SOUZA et al., 2017).

O sensor FS4 no modo ativo, não apresentou correlação entre rendimento de grãos e informações espectrais nas fases fenológicas (Tabela 3). O dossel do crambe até 48 DAS (crescimento vegetativo) não recobre totalmente o solo; de 66 a 114 DAS é formado principalmente por flores e grãos.

Com isso, o modo ativo não representa as reais características da cultura a campo nas fases fenológicas de floração, granação e maturação, devido ao sensoriamento de informações espectrais de apenas uma folha por repetição.

Foram criados modelos de regressões lineares com as informações espectrais das fases fenológicas do crambe que apresentaram correlação ordinal com o rendimento de grãos. Foram identificados e excluídos dois pontos discrepantes, utilizando dez amostras experimentais para geração e análise dos modelos. Os modelos NDMI 66 DAS e Red 66 DAS baseados no modo passivo do FS4 exercem efeito sobre o rendimento.

O NDMI no início da floração (66 DAS) apresentou maior poder explicativo (R^2_{adj} : 0,49) quando comparado ao modelo da banda do vermelho – Red no mesmo período de desenvolvimento do crambe (R^2_{adj} : 0,36) (Tabela 4). O RMSE, que descreve o erro real do modelo, demonstra que NDMI 66 DAS gerou, em média, erro de 134,80 kg ha⁻¹, equivalente a 10,76% do rendimento médio de grãos e Red 66 DAS, o maior erro (151,38 kg ha⁻¹), equivalente a 12,08% do rendimento médio. Os modelos apresentaram coeficiente d_r de 0,64 e 0,63, respectivamente, valores similares quanto ao ajuste entre valores ajustados e observados.

Tabela 4 Parâmetros e equações dos modelos de regressões lineares entre dados espectrais (faixas espectrais e índices de vegetação-IVs) nas fases de desenvolvimento e rendimento de grãos de crambe

Sensor	Dados espectrais/ IVs	p- valor	Modelo	R ²	R ² _{adj}	RMSE	d _r
Fs4 Passivo	NDVI 114 DAS	0,13 ^{ns}					
	SAVI 114 DAS	0,13 ^{ns}					
	NDMI 66 DAS	0,01*	$y = 6014,96 - 8711,27 \cdot \text{NDMI}$	0,55	0,49	134,80	0,64
	Red 66 DAS	0,01*	$y = 423,79 + 29272,85 \cdot \text{Red}$	0,43	0,36	151,38	0,63
	Red 114 DAS	0,13 ^{ns}					
	Red Σ 48/66 DAS	0,07 ^{ns}					
	Red Edge 66 DAS	0,15 ^{ns}					

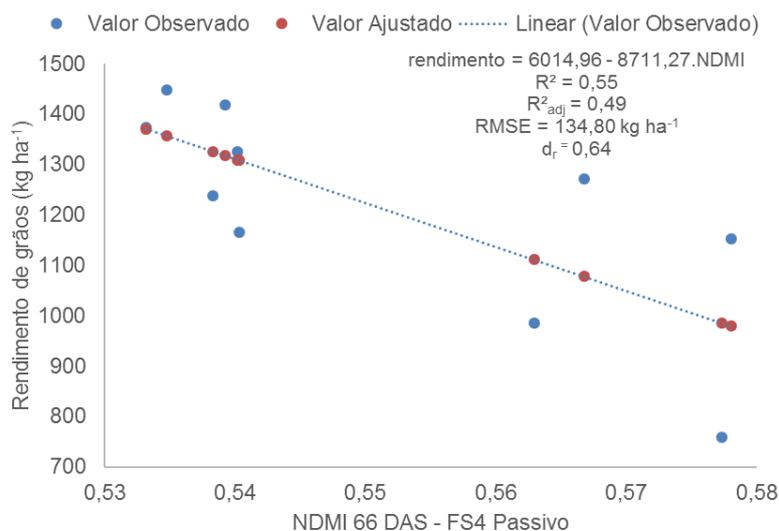
^{ns} - não significativo; *5% de significância; GS - Greenseeker®; FS4 - FieldSpec® 4; y - rendimento de grãos de crambe.

No início do florescimento (66 DAS), o NDMI apresentou correlação linear negativa com o rendimento de grãos. Ao analisar a banda espectral infravermelho médio – IVM, que compõe o índice (1550 a 1750 nm), foi verificada a influência da reflectância desta faixa nos resultados obtidos. Os dados sugerem que, ao aumentar a reflectância na faixa do IVM, ocorre redução no valor de NDMI e aumenta-se o rendimento (Figura 7a).

Esta faixa espectral é sensível à umidade presente nas plantas, demonstrando correlação linear positiva entre NDMI e conteúdo de água foliar em trigo, canola, milho, cevada, dentre outras culturas (COSH et al., 2010; ZHANG, et al., 2007).

O dossel do crambe no início da floração é formado principalmente por ramos e flores, sendo que as folhas ficam posicionadas abaixo destas estruturas, o que reduz a umidade presente na porção sensoriada. Nesse período, caso o crambe não apresente ou reduza o número de ramos e flores, há decréscimo no rendimento de grãos, o que pode causar a correlação negativa encontrada. Viana et al. (2015) relatam que o crambe que tem potencial de ramificação elevado e plantas mais ramificadas resultam em maior rendimento.

A banda espectral do vermelho – Red (648 a 672 nm) em 66 DAS apresentou correlação linear positiva com rendimento de grãos de crambe (Figura 7b). Este comportamento pode estar relacionado à ramificação e à quantidade de flores presentes no dossel da planta, pois quanto maior o número de flores, maior a reflectância. Estes dados estão de acordo com os resultados obtidos por Wilson, Zhang e Kovacs (2014), que, em observações no estágio de floração da canola, obtiveram maiores valores de reflectância quando comparada à soja, trigo, aveia e cevada, devido à presença de flores no dossel.



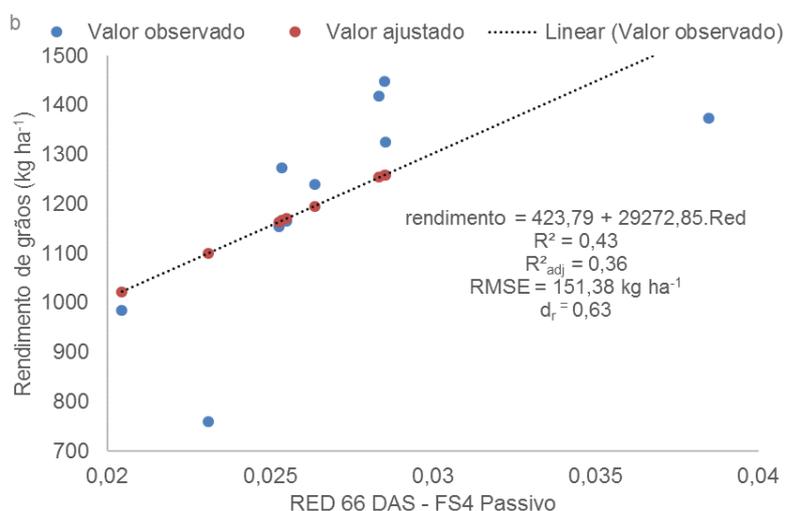


Figura 7 a) Análises de regressão linear entre NDMI na fase fenológica de floração (66 DAS) do crambe e rendimento de grãos; b) Análises de regressão linear entre faixa espectral do vermelho na fase fenológica de floração (66 DAS) do crambe e rendimento de grãos.

Os resíduos dos modelos demonstram normalidade (teste Shapiro-Wilk), são homocedásticos (teste Breusch-Pagan) e há ausência de autocorrelação por Durbin-Watson.

Vale ressaltar que elevadas precipitações e ventos elevados verificados nas fases de floração, granação e maturação causaram debulha de grãos, interferiram no rendimento e tendem a reduzir a capacidade explicativa do rendimento por faixas espectrais e índices de vegetação no estudo. Em estudo conduzido com canola durante três safras, não foram obtidos elevadas correlações entre índices de vegetação e rendimento de grãos devido à baixa precipitação que interferiu no desenvolvimento da cultura (DOMÍNGUEZ et al., 2017).

Apesar do rendimento de grãos ser dependente de diversos fatores edafoclimáticos, sanidade das sementes e plantas, ataque de pragas e doenças durante o ciclo de desenvolvimento, os modelos gerados por NDMI 66 DAS e a banda espectral do vermelho – Red 66 DAS foram capazes de estimar o rendimento com erros próximos a 10% do rendimento médio (1253,13 kg ha⁻¹).

Logo, os resultados obtidos auxiliam na promoção dos estudos relacionados ao crambe, sobretudo pelo fato desta cultura apresentar significativa importância econômica para a produção de fluídos isolantes para equipamentos elétricos, cultivada há poucos anos no país e com pesquisas escassas (BASSEGIO et al., 2016).

4 CONCLUSÕES

Os modelos de regressões lineares gerados pelo Índice de Umidade de Diferença Normalizada (NDMI) e pela faixa espectral do vermelho no início da floração da planta (66 DAS) com o sensor FieldSpec® 4 Hi-Res, modo passivo, foram suficientes para prever o rendimento de grãos de crambe.

REFERÊNCIAS

- ASDINC. **FieldSpec4 – User manual**. ASD Docume ed. Boulder-CO: PANalytical company, 2015. 87 p.
- BASSEGIO, D.; ZANOTTO, M. D.; SANTOS, R. F.; WERNCKE, I.; DIAS, P. P.; OLIVO, M. Oilseed crop crambe as a source of renewable energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 311-321, 2016.
- BATTAY, A. El; MAHMOUDI, H. Linear spectral unmixing to monitor crop growth in typical organic and inorganic amended arid soil. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 37, p. 1-11, 2016.
- BRASIL. **Regras para análise de sementes**. 1. ed. Brasília: MAPA, ACS, 2009.
- CLEUGH, H. A.; MILLER, J. M.; BÖHM, M. Direct mechanical effects of wind on crops. **Agroforestry Systems**, v. 41, n. 1, p. 85-112, 1998.
- COSH, M. H.; TAO, J.; JACKSON, T. J.; MCKEE, L.; O'NEILL, P. Vegetation water content mapping in a diverse agricultural landscape: National Airborne Field Experiment 2006. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 4, n. 1, p. 1-10, 2010.
- DOMÍNGUEZ, J. A.; KUMHÁLOVÁ, J.; NOVÁK, P. Assessment of the relationship between spectral indices from satellite remote sensing and winter oilseed rape yield. **Agronomy research**, v. 15, n. 1, p. 55-68, 2017.
- FOSTER, A. J.; KAKANI, V. G.; MOSALI, J. Estimation of bioenergy crop yield and N status by hyperspectral canopy reflectance and partial least square regression. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 2, p. 192-209, 2017.
- GLASER, L. K. **Crambe: an Economic Assessment of the Feasibility of Providing Multiple-Peril Crop Insurance**. Washington: Risk Management Agency, Federal Crop Insurance Corporation, 1996.
- HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.
- JIN, S.; SADER, S. A. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n. 3, p. 364-372, 2005.
- KMEC, P.; WEISS, M. J.; MILBRATH, L. R.; SCHATZ, B. G.; HANZEL, J.; HANSON, B. K.; ERIKSMOEN, E. D. Growth analysis of crambe. **Crop Science**, v. 38, n. 1, p. 108-112, 1998.
- LI, D.; CHENG, T.; ZHOU, K.; ZHENG, H.; YAO, X.; TIAN, Y.; ZHU, Y.; CAO, W. WREP: A wavelet-based technique for extracting the red edge position from reflectance spectra for estimating leaf and canopy chlorophyll contents of cereal crops. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 129, p. 103-117, 2017.
- LI, S.; LI, M.; DING, Y.; ZHAO, R. Variable rate fertilization based on spectral index and remote sensing. **Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering**, v. 7857, 2010.
- MEWES, T.; FRANKE, J.; MENZ, G. Multitemporal spectroscopy for crop stress detection

using band selection methods. **Proceedings of SPIE – Optics & Photonics**, v. 7086, p. 9, 2008.

MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 4, p. 358-371, 2013.

NTECH INDUSTRIES. **Model 505 GreenSeeker Hand Held™ Optical Sensor Unit Operating Manual**. Ukiah-CA: NTech Industries, 2007. 21p.

OLIVEIRA, R. C. de; REIS, A. C. C. S.; AGUIAR, C. G. de; VIECELLI, C. A.; PRIMEIRI, C.; TOMASI, G. A.; BLEIL JUNIOR, H. G.; ANDRADE, M. A. A.; VIANA, O. H. **Agroindustrialização do crambe**. 2. ed. Cascavel: Assoeste, 2015.

PILAU, F. G.; BATTISTI, R.; SOMAVILLA, L.; SCHWERZ, L. Temperatura basal, duração do ciclo e constante térmica para a cultura do crambe. **Bragantia**, v. 70, n. 4, p. 958-964, 2011.

PITOL, C. **Cultura do crambe**. Tecnologia e Produção: Milho Safrinha e Culturas de Inverno - 2008. Fundação MS, 2008.

PITOL, C.; BROCH, DIRCEU, L.; ROSCOE, R. **Tecnologia e Produção de Crambe**. 1. ed. Maracaju-MS: Fundação MS, 2010. 60 p.

PONZONI, F. J.; SIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação – atualizada e ampliada**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 176p.

PORTELLA, J. A.; TOMM, G. O. **Enleiramento e colheita de canola**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2007.

RISSINI, A. L. L.; KAWAKAMI, J.; GENÚ, A. M. Índice de vegetação por diferença normalizada e produtividade de cultivares de trigo submetidas a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 6, p. 1703-1713, 2015.

ROUSE, J. W.; HASS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite Symposium, 3, 1974, Washington. **Proceedings**. Washington: NASA, 1974. p.309-317.

SANTOS, H. G.; CARVALHO JUNIOR, W.; DART, R. O.; ÁGLIO, M. L. D.; SOUSA, J. S.; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. S.; OLIVEIRA, A. P. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

SANTOS, R. F.; VIANA, O. H.; TOKURA, L. K.; SECCO, D.; LEWANDOSKI, C. F.; BUENO, P. L.; ANDO JUNIOR, O. H.; ALVES, H. J. Assessment of a crambe (*Crambe abyssinica* Hochst) crop under no-tillage in different sowing dates. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 38, p. 3690-3695, 2016.

SOUZA, R. S. de; CHAVES, L. H. G. Phosphorus and potassium doses in the development of Crambe abyssinica culture. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 2, p. 71-75, 2016.

SOUZA, H. B.; BAILO, F. H. R.; NEVES, D. C. Using Passive and Active Multispectral Sensors on the Correlation With the Phenological Indices of Cotton. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 4, p. 782-789, 2017.

VIANA, O. H.; SANTOS, R. F.; OLIVEIRA, R. C.; SECCO, D.; SOUZA, S. N. M.; TOKURA, L. K.; SILVA, T. R. B.; GURGACZ, F. Crambe (*Crambe abyssinica* H.) development and productivity under different sowing densities. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, n. 8, p. 690-695, 2015.

WANG, L.; HUNT JR., E. R.; QU, J. J.; HAO, X.; DAUGHTRY, C. S. T. Remote sensing of fuel moisture content from canopy water indices and normalized dry matter index. **Remote Sensing of Environment**, v. 129, n. 1, p. 103-110, 2013.

WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 13, p. 2088-2094, 2012.

WILSON, J. H.; ZHANG, C.; KOVACS, J. M. Separating crop species in Northeastern Ontario using hyperspectral data. **Remote Sensing**, v. 6, n. 2, p. 925-945, 2014.

ZANZARINI, F. V.; PISSARA, T. C.; BRANDÃO, F. J. C.; TEIXEIRA, D. D. B. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat / ETM + com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 6, p. 608-614, 2013.

ZHANG, X.; JIAO, Q.; WU, D.; ZHANG, B.; GAO, L. Estimating foliar water content of winter wheat with hyperspectral image. **Society of Photo-optical Instrumentation Engineers**, v. 6787, 2007.

ZHENG, H.; CHENG, T.; YAO, X.; DENG, X.; TIAN, Y.; CAO, W.; ZHU, Y. Detection of rice phenology through time series analysis of ground-based spectral index data. **Field Crops Research**, v. 198, p. 131-139, 2016.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sensor terrestre FieldSpec® 4 Hi-Res (FS4) foi capaz de caracterizar o padrão espectro-temporal da cultura do crambe, relacionando as informações espectrais com as fases fenológicas da planta. No início da floração e em pleno crescimento vegetativo, ocorreu a saturação do NDVI – situação já identificada em diversas pesquisas com diferentes culturas, em que o índice satura em dosséis recobertos por biomassa. Ao aplicar o fator de ajuste L, o SAVI minimizou a saturação gerada no NDVI. Ambos os índices apresentaram comportamento similar, crescimento linear até o início da floração e pleno crescimento vegetativo. Após este período, os valores decrescem até atingir a maturação das plantas.

Estes dados fornecem embasamento técnico para monitoramento do crambe por sensores orbitais, auxiliando nas futuras delimitações de áreas de cultivo e estimativas de safras da planta.

Ao avaliar a relação entre medidas espectrais obtidas por sensores terrestres e dados de rendimento de grãos, foi possível identificar o potencial do sensor FS4 passivo. A faixa espectral do vermelho e o índice NDMI, ambos em 66 DAS, início da floração da planta, apresentaram modelos capazes de estimar o rendimento de grãos do crambe. Os dados coletados pelos sensores Greenseeker® 505 Handheld (GS) e FS4, modo ativo, não apresentaram correlação com o rendimento da planta.

Excesso de precipitação e ventos elevados nas fases de floração, granação e maturação contribuíram para a debulha de sementes e o aumento na variabilidade no rendimento de grãos. Isto reduziu a capacidade explicativa dos modelos gerados a partir de diferentes medidas espectrais, índices de vegetações nas fases fenológicas de desenvolvimento do crambe. É válida a repetição do experimento com intuito de minimizar a variabilidade no rendimento de grãos e reavaliar os modelos obtidos a partir de informações espectrais dos sensores FS4 e GS, que em diversas pesquisas demonstram eficiência na estimativa de parâmetros agrônômicos de várias culturas anuais.

Considerando que pesquisas demonstram que a cultura do crambe é alternativa na rotação de culturas, sendo capaz de descompactar camadas superficiais do solo e agregar rentabilidade para os produtores rurais no cultivo na safra de inverno e na entressafra, devido ao óleo produzido, que tem potencial na produção de biodiesel e fluídos isolantes. Recomendam-se novos estudos visando identificar as características espectro-temporais do crambe em diferentes épocas de semeadura e manejo quanto às doses de fertilizantes utilizadas na semeadura e via foliar, além de analisar o comportamento em outras regiões do país, principalmente em estados como o Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás onde há relatos do cultivo comercial e mercado do crambe.

APÊNDICES

Material suplementar – Artigo 2

1. Rendimento de grãos (kg ha^{-1}) e dados espectrais (NDMI; banda espectral do vermelho – Red) obtidos em 66 DAS, safra 2015.

Amostras experimentais	Rendimento de grãos (kg ha^{-1})	NDMI 66 DAS	Red 66 DAS
1	1148,00	0,5348	0,0285
2	1153,29	0,5780	0,0253
3	984,83	0,5629	0,0205
4*	1434,84	0,5437	0,0232
5	1238,87	0,5383	0,0264
6	759,23	0,5774	0,0231
7	1374,39	0,5331	0,0385
8	1272,31	0,5668	0,0254
9*	1461,43	0,5689	0,1498
10	1418,79	0,5392	0,0284
11	1325,45	0,5402	0,0285
12	1166,12	0,5403	0,0255

* valores discrepantes, não utilizados na geração e análise dos modelos.

2. Análise de variância (ANOVA) do modelo de regressão linear gerado entre NDMI 66 DAS e rendimento de grãos (kg ha^{-1}).

Fonte de Variação (FV)	Tabela da ANOVA				
	G.L.	SQ	QM	Estat. F	P-valor
Regressão	1	222462,99	222462,99	9,79	0,014
Resíduos	8	181707,75	22713,47		

3. Análise de variância (ANOVA) do modelo de regressão linear gerado entre Red 66 DAS e rendimento de grãos (kg ha^{-1}).

Fonte de Variação (FV)	Tabela da ANOVA				
	G.L.	SQ	QM	Estat. F	P-valor
Regressão	1	175003,39	175003,39	6,11	0,039
Resíduos	8	229167,35	28645,92		