



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**USO DO ÍNDICE DE REFLECTÂNCIA NDVI NA ESTIMATIVA DE  
CARACTERÍSTICAS FENOTÍPICAS EM QUATRO GENÓTIPOS DE  
FEIJÃO-COMUM**

**ARTHUR VIEIRA DE SANTANA**

Orientador:

**Dr. Alexandre Bryan Heinemann**

Setembro - 2015

**ARTHUR VIEIRA DE SANTANA**

**USO DO ÍNDICE DE REFLECTÂNCIA NDVI NA ESTIMATIVA DE  
CARACTERÍSTICAS FENOTÍPICAS EM QUATRO GENÓTIPOS DE  
FEIJÃO-COMUM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração: Produção Vegetal.

Orientador:

**Dr. Alexandre Bryan Heinemann**

Goiânia, GO – Brasil

2015

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**GPT/BC/UFG**

**Santana, Arthur V.**

**S237i Uso do índice de reflectância NDVI na estimativa de características fenotípicas em quatro genótipos de feijão-comum [manuscrito] / Arthur Vieira Santana. - 2015.**  
79f. : il., figs, tabs.

**Orientador: Dr. Alexandre Bryan Heinemann.**  
**Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia, 2015.**  
**Bibliografia.**  
**Inclui lista de figuras e tabelas.**

- 1. *Phaseolus vulgaris* – Feijão. 2. Medição da reflectância– Sensoriamento. 3. Indicadores biofísicos – Produção. I. Universidade Federal de Goiás. II. Título**

**CDU:**

**ARTHUR VIEIRA SANTANA**

**TÍTULO: Uso do índice de reflectância NDVI na estimativa de características fenotípicas em quatro genótipos de feijão-comum**

Dissertação DEFENDIDA e APROVADA em 22 de setembro de 2015, pela Banca

Examinadora constituída pelos membros:

---

Dr. Alexandre Bryan Heinemann  
EMBRAPA ARRZOZ E FEIJÃO - CNPAF

---

Dr. Luís Fernando Stone  
EMBRAPA ARRZOZ E FEIJÃO - CNPAF

---

Dr.<sup>a</sup> Patrícia Pinheiro da Cunha  
ESCOLA DE AGRONOMIA - UFG

Goiânia - Goiás  
Brasil

*A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento envolvido e não na vitória propriamente dita.*

*Mahatma Gandhi*

A minha mãe, Elizeth, minha fortaleza,  
ao meu pai, Iron, meu maior incentivador,  
a minha irmã Debora,  
as minhas avós, Julieta e Helena  
Dedico

A toda minha família  
Ofereço

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, sem Ele nada seria possível.

Ao Dr. Alexandre Bryan Heinemann, não apenas pela orientação, paciência e dedicação, mas por sempre me incentivar e aconselhar.

A minha coorientadora Anna Cristina Lanna, pela paciência, ajuda, ensinamentos e dedicação.

A EMBRAPA Arroz e Feijão, pela estrutura e apoio, que viabilizaram todo o desenvolvimento do mestrado.

A todos os colaboradores e estagiários da EMBRAPA que estiveram envolvidos e contribuíram sobremaneira.

A todos os professores e funcionários do programa do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UFG.

A todos os colegas de curso com quem convivi durante este período, em especial aos amigos Renato Araújo e Thallyta Rodrigues, com quem dividi alegrias e angustias durante o período de pós-graduação.

Aos amigos Antônio Edson e Érica Cristina pela compreensão e valorização do meu potencial, principalmente nos últimos meses de mestrado.

A toda minha família, em especial a minha mãe Elizeth, que sempre esteve presente participando dos meus sonhos e me apoiando, ao meu pai Iron, de quem herdei tanta disciplina e persistência, a minha irmã Debora, pela ajuda e incentivo.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente participaram desta dissertação de mestrado.

## SUMÁRIO

### LISTA DE TABELAS

### LISTA DE FIGURAS

### RESUMO

### ABSTRACT

|          |  |    |
|----------|--|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                    | 1  |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>                          | 3  |
| 2.1      | O FEIJOEIRO .....  | 3  |
| 2.2      | IMPORTÂNCIA ECONÔMICA .....                                | 4  |
| 2.3      | O CULTIVO DO FEIJOEIRO .....                               | 7  |
| 2.4      | PRINCÍPIOS DO SENSORIAMENTO REMOTO .....                   | 8  |
| 2.5      | RADIOMETRIA DE CAMPO.....                                  | 12 |
| 2.6      | ÍNDICES DE REFLECTÂNCIA .....                              | 14 |
| 2.7      | ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) ..... | 17 |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                           | 20 |
| 3.1      | CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO.....                         | 20 |
| 3.1.1    | <b>Local e clima .....</b>                                 | 20 |
| 3.1.2    | <b>Arranjo experimental e semeadura.....</b>               | 21 |
| 3.1.3    | <b>Tratos culturais .....</b>                              | 22 |
| 3.2      | CARACTERIZAÇÃO DAS CULTIVARES .....                        | 23 |
| 3.3      | INDICADORES FISIOLÓGICOS DO CRESCIMENTO .....              | 25 |
| 3.4      | ÍNDICE DE REFLECTÂNCIA .....                               | 25 |
| 3.5      | EQUIPAMENTOS .....   | 26 |
| 3.5.1    | <b>Integrador de área foliar LI-3100 C.....</b>            | 26 |
| 3.5.2    | <b>Sensor de luz Crop Circle ACS-430 .....</b>             | 27 |
| 3.5      | ANÁLISE ESTATÍSTICA .....                                  | 28 |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS E DISCUSÃO .....</b>                         | 32 |
| 4.1      | ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR .....                                | 33 |
| 4.2      | MATÉRIA SECA TOTAL .....                                   | 37 |
| 4.3      | MATÉRIA SECA DE COLMOS .....                               | 42 |
| 4.4      | MATÉRIA SECA DE FOLHA .....                                | 47 |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES.....</b>                                     | 52 |
| <b>6</b> | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                    | 53 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1.</b> Reflectância média de vários tipos de biomas (Adaptado de Wang et al., 2001) .....  | 12 |
| <b>Tabela 2.</b> Modelos que apresentaram transformação na análise estatística dos dados .....   | 29 |
| <b>Tabela 3.</b> Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa do índice de área foliar para os diferentes genótipos em cada data de semeadura (maio – I e junho – II), em Santo Antônio de Goiás-GO .....         | 35 |
| <b>Tabela 4.</b> Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa do índice de área foliar para os diferentes genótipos nas duas datas de semeadura, em Santo Antônio de Goiás-GO .....                               | 36 |
| <b>Tabela 5.</b> Valores dos índices estatísticos da avaliação do modelo de estimativa do índice de área foliar da cultura para todos os genótipos e nas duas datas de semeadura, em Santo Antônio de Goiás-GO .....                         | 37 |
| <b>Tabela 6.</b> Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa da matéria seca total de plantas para os diferentes genótipos em cada data de semeadura (maio – I e junho – II), em Santo Antônio de Goiás-GO ..... | 39 |
| <b>Tabela 7.</b> Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa da matéria seca total de plantas para os diferentes genótipos nas duas datas de semeadura, em Santo Antônio de Goiás-GO .....                       | 40 |
| <b>Tabela 8.</b> Valores dos índices estatísticos da avaliação do modelo de estimativa da matéria seca total de plantas para todos os genótipos e nas duas datas de semeadura, em Santo Antônio de Goiás-GO .....                            | 42 |
| <b>Tabela 9.</b> Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa da matéria seca de colmo para os diferentes genótipos em cada data de semeadura (maio – I e junho – II), em Santo Antônio de Goiás-GO .....         | 44 |
| <b>Tabela 10.</b> Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa da matéria seca de colmo para os diferentes genótipos nas duas datas de semeadura, em Santo Antônio de Goiás-GO .....                              | 45 |
| <b>Tabela 11.</b> Valores dos índices estatísticos da avaliação do modelo de estimativa da matéria seca de colmo para todos os genótipos e nas duas datas de semeadura, em Santo Antônio de Goiás-GO .....                                   | 46 |
| <b>Tabela 12.</b> Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa da matéria seca de folha para os diferentes genótipos em cada data de semeadura (maio – I e junho – II), em Santo Antônio de Goiás-GO .....        | 49 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabela 13.</b> Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa da matéria seca de folha para os diferentes genótipos nas duas datas de semeadura, em Santo Antônio de Goiás-GO ..... | 50 |
| <b>Tabela 14.</b> Valores dos índices estatísticos da avaliação do modelo de estimativa da matéria seca de folha para todos os genótipos e para todas as datas de colheita, em Santo Antônio de Goiás-GO.....   | 51 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1.</b> Regiões produtoras de feijão no mundo (Adaptado de FAOSTAT, 2014).....  | 5  |
| <b>Figura 2.</b> Valor bruto da produção das principais culturas anuais produzidas no Brasil do ano de 2003 a 2014 (Adaptado de MAPA, 2014) .....  | 5  |
| <b>Figura 3.</b> Mapa da produção total de feijão no Brasil – primeira, segunda e terceira safra (Fonte: CONAB, 2015) .....  | 6  |
| <b>Figura 4.</b> Espectro eletromagnético .....  | 10 |
| <b>Figura 5.</b> Energia solar (I) incidente sobre a vegetação e os processos de interação: (A) absorção, (R) reflexão e (T) transmissão (Fonte: Moreira, 2007).....   | 10 |
| <b>Figura 6.</b> Reflectância espectral da folha do feijoeiro em diferentes comprimentos de onda (Adaptado de Malthus & Madeira, 1993).....  | 11 |
| <b>Figura 7.</b> Comportamento do NDVI em função da área foliar de diferentes coberturas vegetais (Adaptado de Wang et al., 2001) .....  | 18 |
| <b>Figura 8.</b> Temperatura média, máxima e mínima e evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) durante o desenvolvimento do estudo, A) semeadura em 17/05/2013 e B) semeadura em 03/07/2013, em Santo Antônio de Goiás-GO..... | 20 |
| <b>Figura 9.</b> Tratos culturais realizados, A) adubação com cloreto de potássio, B) adubação com ureia C) aplicação de herbicidas e D) aplicação de inseticidas .....  | 23 |
| <b>Figura 10.</b> A) Irrigação por aspersão, B) com manejo da umidade do solo realizado por tensímetros .....  | 23 |
| <b>Figura 11.</b> Determinação da área foliar com o integrador de área foliar fotoelétrico LI-COR, modelo LI-3100 C.....   | 25 |
| <b>Figura 12.</b> Leitura dos índices de reflectância dos cultivares de feijão com o sensor radiométrico Crop Circle .....   | 26 |
| <b>Figura 13.</b> Integrador de área foliar LI-3100C.....  | 27 |
| <b>Figura 14.</b> Sensor de luz Crop Circle ACS-430 utilizado para a medição do NDVI do feijoeiro, em Santo Antônio de Goiás-GO .....  | 27 |
| <b>Figura 15.</b> Comportamento do NDVI em função dos dias após a emergência da cultura para a semeadura realizada em 17/05/2013 (primeira data de semeadura), em Santo Antônio de Goiás-GO .....                                | 32 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 16.</b> Comportamento do NDVI em função dos dias após a emergência da cultura para a semeadura realizada em 03/07/2013 (segunda data de semeadura), em Santo Antônio de Goiás-GO .....   | 33 |
| <b>Figura 17.</b> Regressões entre o índice de área foliar e o NDVI na primeira e segunda data de semeadura, respectivamente, para os genótipos BRS Agreste (a e e), Bat 477 (b e f), BRS Pérola (c e g) e BRS Pontal (d e h), em Santo Antônio de Goiás-GO .....        | 34 |
| <b>Figura 18.</b> Regressões entre o índice de área foliar e o NDVI para a média das duas datas de semeadura para os genótipos BRS Agreste (a), Bat 477 (b), BRS Pérola (c) e BRS Pontal (d), em Santo Antônio de Goiás-GO.....  | 36 |
| <b>Figura 19.</b> Regressões entre o índice de área foliar e o NDVI para a média das duas datas de semeadura e dos quatro genótipos de feijão, em Santo Antônio de Goiás-GO .....  | 37 |
| <b>Figura 20.</b> Regressões entre a matéria seca total de plantas e o NDVI na primeira e segunda data de semeadura, respectivamente, para os genótipos BRS Agreste (a e e), Bat 477 (b e f), BRS Pérola (c e g) e BRS Pontal (d e h), em Santo Antônio de Goiás-GO..... | 38 |
| <b>Figura 21.</b> Regressões entre a matéria seca total de plantas e o NDVI para a média das duas datas de semeadura para os genótipos BRS Agreste (a), Bat 477 (b), BRS Pérola (c) e BRS Pontal (d), em Santo Antônio de Goiás-GO .....                                 | 40 |
| <b>Figura 22.</b> Regressão entre a matéria seca total de plantas e o NDVI para a média das duas datas de semeadura e dos quatro genótipos de feijão, em Santo Antônio de Goiás-GO .....   | 41 |
| <b>Figura 23.</b> Regressões entre a matéria seca de colmo e o NDVI na primeira e segunda data de semeadura, respectivamente, para os genótipos BRS Agreste (a e e), Bat 477 (b e f), BRS Pérola (c e g) e BRS Pontal (d e h), em Santo Antônio de Goiás-GO .....        | 43 |
| <b>Figura 24.</b> Regressões entre a matéria seca de colmos e o NDVI para a média das duas datas de semeadura para os genótipos BRS Agreste (a), Bat 477 (b), BRS Pérola (c) e BRS Pontal (d), em Santo Antônio de Goiás-GO.....   | 45 |
| <b>Figura 25.</b> Regressão entre a matéria seca de colmo e o NDVI para a média de duas datas de semeadura e quatro genótipos de feijão, em Santo Antônio de Goiás-GO .....  | 46 |
| <b>Figura 26.</b> Regressões entre a matéria seca de folha e o NDVI na primeira e segunda data de semeadura, respectivamente, para os genótipos BRS Agreste (a e e), Bat 477 (b e f), BRS Pérola (c e g) e BRS Pontal (d e h), em Santo Antônio de Goiás-GO .....        | 48 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 27.</b> Regressões entre a matéria seca de folha e o NDVI para a média das duas datas de semeadura para os genótipos BRS Agreste (a), Bat 477 (b), BRS Pérola (c) e BRS Pontal (d), em Santo Antônio de Goiás-GO..... | 49 |
| <b>Figura 28.</b> Regressão entre a matéria seca de folha e o NDVI para a média das duas datas de semeadura e dos quatro genótipos de feijão, em Santo Antônio de Goiás-GO .....  | 50 |

## RESUMO

SANTANA, A. V. **Uso do índice de reflectância NDVI na estimativa de características fenotípicas em quatro genótipos de feijão-comum.** 2015. 79f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Produção Vegetal) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.<sup>1</sup>

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é um dos principais componentes da dieta da população brasileira e está entre as quatro culturas economicamente importantes no Brasil, dentre as culturas anuais. Dada à importância social e econômica do feijoeiro, é necessário o desenvolvimento de métodos que possibilitem o monitoramento das condições das plantas. Nesse contexto surge o sensoriamento remoto, no qual a interação do espectro eletromagnético com os vegetais resulta em absorção, reflexão ou transmissão da energia. Para o sensoriamento remoto a energia refletida é o principal objeto de estudo. A energia após interação é refletida em diversos comprimentos de onda, cujas combinações dão origem aos índices de vegetação. Diversos são os índices de vegetação obtidos a partir do sensoriamento remoto, dentre eles um dos mais utilizados é o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI, *normalized difference vegetation index*). O sensoriamento remoto tem se tornado uma importante ferramenta para pesquisadores e, principalmente, para ações governamentais, pois permite identificar e monitorar culturas, realizar acompanhamento das safras, fazer projeções e fiscalizar o uso do ambiente. De acordo com o exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência do índice de vegetação NDVI na determinação da área foliar, matéria seca total de plantas, matéria seca de colmo e matéria seca de folha de quatro genótipos de feijão-comum. O experimento foi conduzido em campo, no Centro Nacional de Pesquisa da Embrapa Arroz e Feijão, fazenda Capivara, localizado no município de Santo Antônio de Goiás. Utilizou-se o delineamento experimental de blocos ao acaso em esquema fatorial 2x4, duas datas de semeadura e quatro genótipos. Utilizaram-se quatro repetições. As datas de semeadura foram 17/05/2013 e 03/07/2013. Os genótipos utilizados foram: BRS Pérola, Bat 477, BRS Pontal e BRS Agreste. A obtenção do NDVI ocorreu com sensor radiométrico de campo. A determinação do índice de área foliar (IAF), matéria seca total de plantas (MST), matéria seca do colmo (MSC) e matéria seca de folha (MSF) foi realizada com a coleta de cinco plantas por metro, das quais se separou os caules e folhas. Para a determinação da área foliar utilizou-se um integrador de área foliar fotoelétrico. De acordo com os resultados foi possível observar que aos 40 dias após a emergência o NDVI apresentou saturação para as duas datas de semeadura. O IAF, a MST, a MSC e a MSF, para cada genótipo, foram bem estimadas a partir do NDVI. A raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o erro absoluto médio (MAE) se mostraram mais satisfatórios para a avaliação da qualidade dos modelos dentro dos mesmos parâmetros biofísicos. Apesar dos fatores genótipos e data de semeadura terem afetado os ajustes dos modelos, é possível estimar os parâmetros biofísicos da cultura do feijoeiro utilizando-se um modelo genérico. Entre os indicadores biofísicos da cultura a MSC foi o melhor parâmetro estimado no modelo geral e a MSF foi o pior.

*Palavras-chave:* *Phaseolus vulgaris*, reflectância, sensoriamento, indicadores biofísicos

---

<sup>1</sup> Orientador: Dr. Alexandre Bryan Heinemann. EMBRAPA ARROZ E FEIJÃO.

## ABSTRACT

SANTANA, A. V. **Use of the NDVI reflectance index to estimate phenotypic characteristics for four common bean genotypes.** 2015. 79f. Dissertation (Master in Agronomy: Plant Production) - Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.<sup>1</sup>

The common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) is a main component of Brazilian population diet, and is among of the four most economically important annual crop in Brazil. Given the social and economic importance of the bean, the development of methods to enable the condition monitoring of plants is necessary. In this context arises the remote sensing, in which the interaction of the electromagnetic spectrum with vegetables results in absorption, reflection or transmission of energy. For remote sensing the reflected energy is the main object of study. The energy after interaction is reflected in different wavelengths, which combinations give rise to the vegetation index. There are several vegetation index obtained from remote sensing, among them one of the most used is the normalized difference vegetation index (NDVI). Remote sensing has become an important tool for researchers, mainly to government action, since it identifies and monitor crops, harvest time, make projections and supervise the environment. According to the above, the objective of this study was to evaluate the efficiency of the NDVI vegetation index in determining leaf area index, total dry biomass, stem dry matter and leaf dry matter of four common bean genotypes. The experiment was conducted in the field, at the National Rice and Beans Research Center of Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA), located in Santo Antônio of Goiás. Was used the randomized block design in a  $2^4$  factorial design, two sowing dates and four genotypes, in four replications. Sowing dates were 05.17.2013 and 07.03.2013. The genotypes used were: BRS Pérola, Bat 477, BRS Pontal and BRS Agreste. Obtaining the NDVI occurred with radiometric sensor field. The leaf area index (LAI), total dry matter (TDM), stem dry matter (SDM) and leaf dry matter (LDM) were determined with the collection of five plants per meter, which separated the stems and leaves. The leaf area was measured with a photoelectric integrator. According to the results it was observed that at 40 days after emergence NDVI were saturated for two sowing dates. The LAI, the TDM, SDM and LDM for each genotype, were well estimated from NDVI. The root mean square error (RMSE) and the mean absolute error (MAE) were more suitable for assessing the quality of the models within the same biophysical parameters. Despite the genotype and sowing date have affected the adjustment of models, it is possible to estimate the biophysical characteristics from bean with a linear generic model. Among the culture biophysical indicators the SDM was the best parameter estimated overall model and the LDM was the worst.

**Key words:** *Phaseolus vulgaris*, reflectance, sensing, biophysical indicators

---

<sup>1</sup>Adviser: Dr. Alexandre Bryan Heinemann. EMBRAPA RICE AND BEANS.

## **1 INTRODUÇÃO**

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é um importante componente da dieta da população brasileira. Seu consumo per capita *in natura* é de 16 kg pessoa<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Borém & Carneiro, 2006). Segundo Aidar (2003), o feijão também é o principal componente da dieta de programas de combate à fome e à desnutrição. Sua combinação com outros cereais, mais usualmente com o arroz, fornece os oito aminoácidos essenciais ao organismo humano.

Dada à importância econômica e social e à alta variabilidade na produtividade no território nacional, para a cultura do feijão é relevante o desenvolvimento de técnicas e métodos que possibilitem o monitoramento das condições de desenvolvimento das plantas. Diversas técnicas procuram estabelecer relações entre a radiação absorvida pelo dossel da cultura e seus atributos biofísicos (Epiphânia & Formaggio, 1990). Em plantas sadias e adequadamente supridas de água e nutrientes, existe a relação linear positiva entre a quantidade de radiação fotossinteticamente absorvida pelo dossel e a produção de biomassa e grãos (Moreira, 1997). Assim, a partir desses valores espectrais e índices de vegetação, é possível realizar o acompanhamento temporal e espacial do desenvolvimento das culturas, determinar o vigor das plantas e realizar previsões futuras de colheita.

De acordo com Moreira (2007), ao interagir com a folha a radiação se divide em três frações. Em torno de 50% é absorvida pelos pigmentos das folhas e será usada principalmente na fotossíntese. Uma segunda parte é refletida e a terceira será transmitida entre os tecidos adjacentes. Os índices de vegetação são aqueles provenientes de medidas de reflectância do dossel, comumente nas faixas do vermelho e infravermelho próximo do espectro eletromagnético.

Segundo Ramos et al. (2010), os índices de vegetação têm sido muito utilizados, em virtude de possibilitarem prognosticar e avaliar características da cobertura vegetal, como a estimativa da área foliar, produção de biomassa e produtividade. Tais informações podem ser ferramentas valiosas para os produtores, governos e órgãos de pesquisa. São úteis nas tomadas de decisão, manejo da lavoura, planejamento de safra, previsão de colheita, levantamento de informações e fiscalização. Porém, ainda são

necessários estudos mais aprofundados para validação e outras possibilidades de uso desses índices.

Dentre os índices de refletância o NDVI (*Normalized difference vegetation index* – índice de vegetação por diferença normalizada) é um dos mais conhecidos e utilizados para o monitoramento da vegetação. Esse índice é o resultado da combinação das respostas das bandas espectrais do vermelho e do infravermelho (Ramos et al., 2010). No sensoriamento remoto convencional as informações são obtidas principalmente por sensores a bordo de satélites, as quais sofrem interferências atmosféricas e são impossíveis de serem obtidas com grande frequência, resultando em menor acompanhamento de momentos específicos do desenvolvimento das plantas. Entretanto, com a radiometria de campo essas limitações são superadas (Deering, 1980; Epiphanio, 1989), o que resulta na melhor compreensão dos fenômenos biológicos. Os sensores terrestres também possibilitam obter as informações básicas para a calibração e entendimento dos dados orbitais (Huete, 1997).

De acordo com o exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência do índice de vegetação NDVI na estimativa da área foliar, matéria seca total, matéria seca de colmo e matéria seca de folha de quatro genótipos de feijão-comum, em Santo Antônio de Goiás-GO.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 O FEIJOEIRO**

O gênero *Phaseolus* é composto por aproximadamente 35 espécies, porém, apenas quatro são cultivadas, sendo *Phaseolos vulgaris* (feijão-comum) o mais importante economicamente. O feijoeiro é originário da América Central e seu habitat se estende desde o Norte do México até o Noroeste da Argentina (Schoonhoven & Voyest, 1989).

O feijão é uma planta de metabolismo C3, a qual se desenvolve bem em temperaturas amenas (21°C). Essa planta apresenta baixo ponto de compensação por luz, quando comparada com plantas C4, como o milho e sorgo (Laing et al., 1983). O sistema radicular é formado por uma raiz principal, da qual se desenvolvem lateralmente raízes secundárias, terciárias e assim por diante. Nas raízes laterais são observados nódulos colonizados por bactérias fixadoras de nitrogênio (Silva & Costa, 2003).

O caule é o eixo principal da planta e tem origem a partir do meristema apical do embrião. Acima das folhas primárias o caule desenvolve-se de forma dinâmica e ascendente, originando uma sucessão de nós e entrenós. No primeiro nó do caule estão inseridas as folhas cotiledonares e no segundo nó estão inseridas as primeiras folhas verdadeiras da planta. A partir do terceiro nó estão inseridas as chamadas folhas trifolioladas, folhas que possuem três folíolos (Silva & Costa, 2003).

O crescimento do caule pode ser determinado ou indeterminado. O primeiro caracteriza-se por ter os ramos laterais terminando em uma inflorescência e por possuir número limitado de nós, com a floração iniciando do ápice para a base da planta. O segundo caracteriza-se por possuir meristemas vegetativos nas extremidades dos ramos, os quais permitem crescimento contínuo numa sucessão de nós e entrenós (Fancelli & Dourado Neto, 2007).

Os hábitos de crescimento podem ser agrupados em quatro tipos principais: a) *Tipo I* - hábito de crescimento determinado, arbustivo e com plantas de porte ereto; b) *Tipo II* - hábito de crescimento indeterminado, arbustivo, porte da planta ereto e com caule pouco ramificado; c) *Tipo III* - hábito de crescimento indeterminado, prostrado ou semiprostrado, com ramificação bem desenvolvida e aberta; e d) *Tipo IV* - hábito de

crescimento indeterminado, trepador, com forte dominância apical no caule e número reduzido de ramos laterais pouco desenvolvidos (Vilhordo et al., 1980).

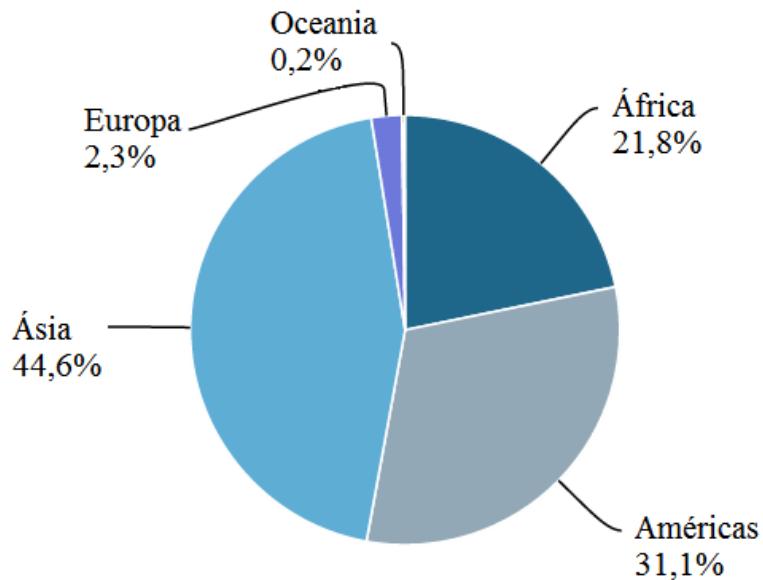
O ciclo do feijão-comum varia normalmente de 60 a 120 dias, dependendo da cultivar e das condições ambientais (Vieira, 1988). O desenvolvimento do feijoeiro é dividido em duas fases, vegetativa e reprodutiva. A fase vegetativa se inicia a partir do desdobramento das folhas primárias, estendendo-se até o aparecimento dos primeiros botões florais. Nessa fase é desejável a ocorrência de temperaturas moderadamente elevadas (entre 21°C e 29,5°C). A fase reprodutiva vai da emissão dos botões florais até o pleno enchimento das vagens e maturação das sementes (Fancelli & Dourado Neto, 2007).

Tanto a fase vegetativa quanto a reprodutiva são divididas em subfases. A fase vegetativa (V) é dividida nas subfases: V0 – quando 50% das sementes emitiram radícula; V1 – 50% das plântulas com o par de folhas primárias totalmente abertas; V2 – 50% das plantas com o primeiro trifólio completamente aberto; V3 – 50% das plantas com até três trifólios completamente abertos; e V4 – 50% das plantas apresentando mais de três trifólios completamente abertos (Santos & Gavilanes, 2006).

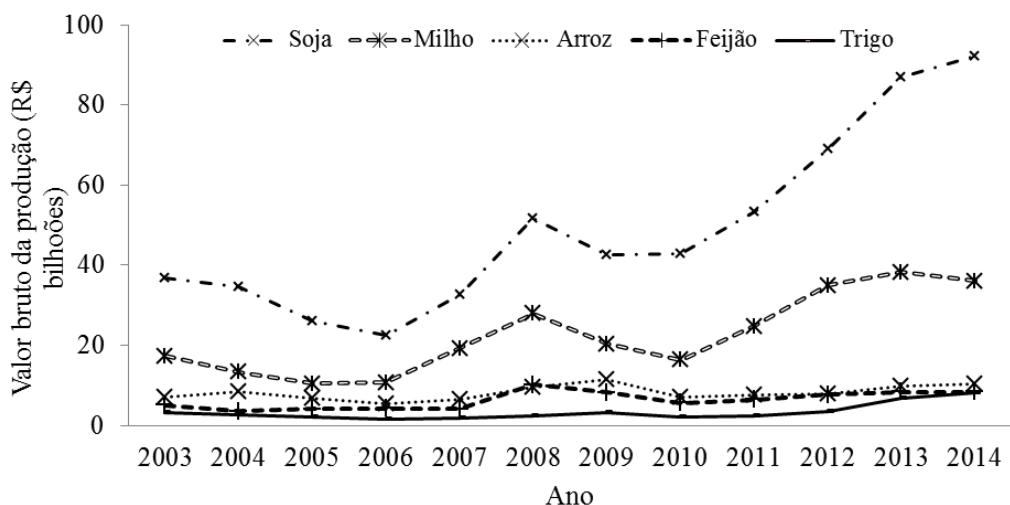
A fase reprodutiva é subdividida nas subfases: R5 – 50% das plantas com botão floral; R6 – 50% da planta com as primeiras flores abertas; R7 – 50% das plantas na fase de enchimento de grãos; e R8 – 50% das plantas com vagens maduras (Santos & Gavilanes, 2006).

## 2.2 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA

A Ásia é o continente que mais produz feijão, no qual se concentra 44,6% da área total cultivada no globo (aproximadamente 10,1 milhões de hectares). O continente Americano é o segundo maior produtor mundial, com 31,1% da área cultivada, aproximadamente 7,1 milhões de hectares (Figura 1). Os três países com maior produção mundial são Myanmar, Índia e Brasil, com produção de 3,7, 3,6 e 2,9 milhões de toneladas, respectivamente (FAOSTAT, 2014). A cultura do feijão é a quinta cultura anual mais produzida no Brasil, com 1,70% da produção total de grãos, em primeiro lugar está a soja com 46,95%, seguida pelo milho com 39,37%, arroz com 6,12% e trigo com 2,97% (CONAB, 2015). O cultivo do feijão também foi o que proporcionou a quarta maior rentabilidade entre as culturas anuais em 2014 (Figura 2).



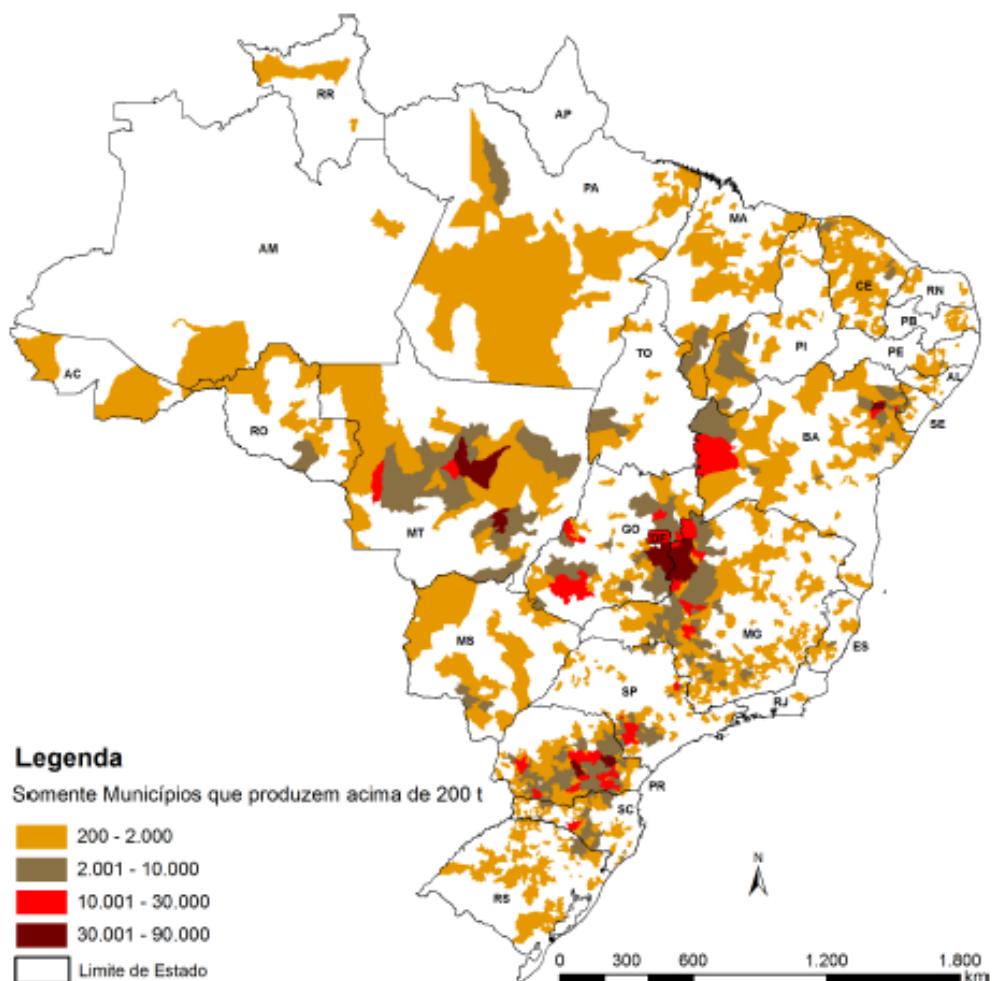
**Figura 1.** Regiões produtoras de feijão no mundo (Adaptado de FAOSTAT, 2014)



**Figura 2.** Valor bruto da produção das principais culturas anuais produzidas no Brasil do ano de 2003 a 2014 (Adaptado de MAPA, 2014)

O feijão é produzido em quase todas as regiões do Brasil. Destacando-se a região Sul com produção de 1,03 milhões de toneladas na safra 2013/2014. Nessa safra o estado de Goiás ocupou a quarta colocação no ranking dos estados produtores, ficando atrás apenas do Paraná, Minas Gerais e Mato Grosso. Em termos de produtividade, o Distrito Federal e Goiás lideraram o ranking com  $2.727 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $2.434 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente. Apesar de ser o maior produtor nacional, o estado do Paraná possui produtividade de  $1.569 \text{ kg ha}^{-1}$  (CONAB, 2014). Na safra 2014/2015 o estado de Goiás ficou em segundo lugar no ranking das maiores produtividades, com  $2.339 \text{ kg ha}^{-1}$ , o

estado de São Paulo ficou em primeiro lugar, com 2.352 kg ha<sup>-1</sup> e o Distrito Federal ficou em terceiro lugar, com 2.298 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2015). O mapa da produção agrícola do feijão para as três safras é apresentado na Figura 3.



**Figura 3.** Mapa da produção total de feijão no Brasil – primeira, segunda e terceira safra  
(Fonte: CONAB, 2015)

A maior parte da produção de feijão de primeira safra está concentrada na região Centro Sul. Na safra 2013/14 o volume da produção dessa região foi de 87% da produção total do país, destacando-se os estados de Paraná, Minas Gerais, Goiás, Santa Catarina e São Paulo. Nos últimos anos as áreas cultivadas diminuíram, resultando em menor capacidade de abastecer o mercado interno. A redução dos impostos sobre as importações do feijão tornaram o Brasil um grande importador, sendo a taxa de importação maior que as de exportação (CONAB, 2014).

Além de sua importância econômica, o feijoeiro também é socialmente necessário, uma vez que a dieta da população brasileira é composta por seus grãos

(Sant'Ana et al., 2011). Essa leguminosa representa a principal fonte de proteína vegetal para a população, principalmente a de baixa renda (Lima et al., 2003). Quando combinado com o arroz, por exemplo, o feijão forma a mistura nutritiva adequada, porque o feijão é pobre em aminoácidos sulfurados e rico em lisina, enquanto o arroz é pobre em lisina e rico em aminoácidos sulfurados (Mesquita et al., 2007).

O feijão é a principal fonte de aminoácidos na alimentação do brasileiro, seguido pela carne bovina e pelo arroz. Esses três alimentos fornecem 70% da proteína consumida pela população (Lajolo et al., 1966). Além de proteína, esse alimento fornece quantidades significativas de calorias, ácidos graxos insaturados (ácido linoleico), fibra alimentar (especialmente fibra solúvel) e é uma excelente fonte de alguns minerais e vitaminas (Kutos et al., 2003).

### 2.3 O CULTIVO DO FEIJOEIRO

No Brasil, o feijão é cultivado em três épocas do ano (Meira, 2005). Assim, seu cultivo é classificado em feijão das águas, feijão da seca (ou safrinha) e feijão de inverno (ou de terceira época). O feijão das águas é semeado no início do período chuvoso e colhido a partir de dezembro (Kranz et al., 1988). Nessa época o cultivo e a colheita podem coincidir com o período de maior concentração das chuvas. Tal fato dificulta a operação de colheita mecanizada e estende o período de permanência da cultura no campo, o que afeta a qualidade final do produto (Stone & Moreira, 2001).

O feijão das secas é cultivado de janeiro a março. Nessa época o plantio e a germinação das sementes ocorrem em condição de boa disponibilidade de água no solo. Porém, pode haver deficiência hídrica nas fases posteriores de desenvolvimento da cultura, tornando necessário o uso da irrigação (Kranz et al., 1988). A fase de maior sensibilidade ao estresse hídrico vai do florescimento ao enchimento da vagem. Nesse período, dependendo da severidade do estresse, pode haver o abortamento das flores. No cultivo de safrinha a grande vantagem é a possibilidade de se realizar a colheita em períodos secos, no qual há menor incidência de fungos e pragas (Stone & Moreira, 2001).

O plantio de inverno (ou terceira época) vai dos meses de maio a julho, mas nem todas as regiões do Brasil a fazem. Ela só é praticada onde o inverno é ameno e não ocorrem geadas, como em algumas áreas nos estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Espírito Santo, onde a lavoura é irrigada durante todo o ciclo (Silva et al., 1989). O Brasil

apresenta produção considerável de feijão de inverno, em virtude dessa ser a principal cultura utilizada na entressafra no Brasil (Barbosa Filho et al., 2001). Segundo Silva et al. (2007), o feijão de entressafra contribui para o aumento da rentabilidade da atividade agrícola em sistemas irrigados.

O feijão pode ser cultivado no sistema de semeadura convencional e direta. Na semeadura convencional as camadas superficiais do solo são previamente descompactadas com o uso de arados e grades, nessas operações os corretivos e adubos também podem ser incorporados. No sistema plantio direto não há o revolvimento do solo, sua estrutura é preservada ao máximo. O controle das plantas daninhas é realizado com o uso de herbicidas (Melo & Brum, 2013). Segundo Carvalho et al. (2006), nos últimos anos métodos de preparo do solo, como o reduzido e o plantio direto, vem sendo adotados em substituição aos convencionais.

A cultura do feijão está sujeita a fatores ambientais, de natureza biótica ou abiótica. Tais fatores interferem direta ou indiretamente no seu crescimento e desenvolvimento, os quais afetam sua produtividade final (Kozlowski et al., 2002). O feijão é pouco tolerante às variações climáticas extremas. Amplitudes térmicas podem causar queda significativa na produtividade e qualidade dos grãos, principalmente nas fases de floração e enchimento dos grãos. O feijoeiro também é pouco tolerante ao déficit hídrico (Nascimento et al., 2011).

Para que a cultura do feijoeiro expresse o seu máximo potencial produtivo é necessário o controle desses fatores limitantes, destacando-se a competição impostas pelas plantas daninhas. A comunidade infestante compete na absorção de nutrientes e água do solo, diminuindo a disponibilidade desses recursos (Salgado et al., 2006), culminando na redução da produtividade da cultura (Pitelli & Duringan, 1984). Algumas plantas daninhas liberam substâncias alelopáticas, que interferem no desenvolvimento do feijoeiro e também atuam como hospedeiras de pragas, doenças e nematóides. Dependendo do grau de infestação, essas plantas podem ainda dificultar a realização de tratos culturais e da colheita (Chisaka, 1977).

## 2.4 PRINCÍPIOS DO SENSORIAMENTO REMOTO

Na atualidade o sensoriamento remoto é cada vez mais utilizado em estudos e aplicações agrícolas. Ele se apresenta como uma importante ferramenta para identificação

e monitoramento das culturas, realizar acompanhamento das safras e fazer estimativas de parâmetros biofísicos (Breuning, 2011). Malthus & Madeira (1993) ainda destacam a importância do sensoriamento remoto na detecção de doenças e na possibilidade de se diminuir custos, com a intervenção no momento adequado. Essa ferramenta também permite predizer a produtividade de diversos ecossistemas, fornece dados para modelos climáticos, hidrológicos, biogeoquímicos e ecológicos (Sellers et al., 1997; Mynemi et al., 2002). Para o governo e órgãos fiscalizadores existem grandes possibilidades de utilização do sensoriamento remoto, com destaque para a estimativa de produção, planejamento de estoque, definição dos preços dos produtos e de estratégias voltadas ao setor agrícola.

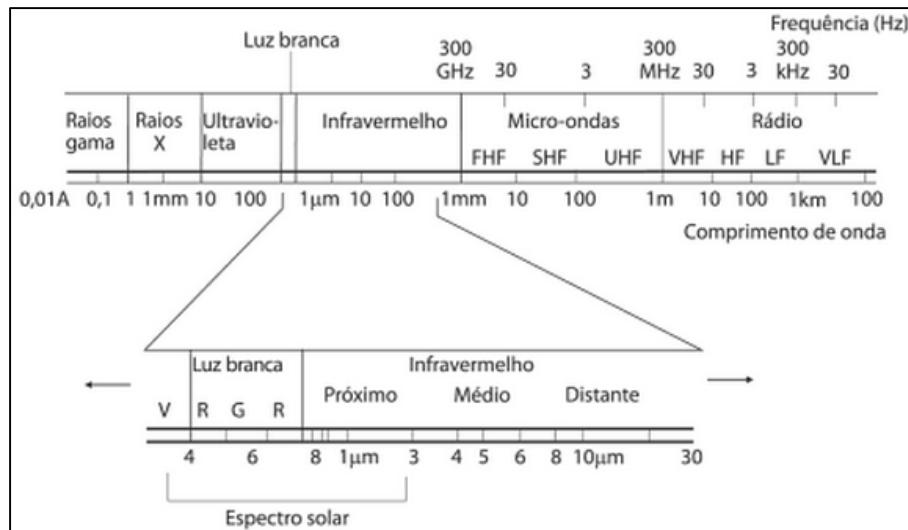
O sensoriamento remoto engloba o uso de sensores de aquisição, transmissão, processamento, veículos, aeronaves e espaçonaves. Esses aparelhos são utilizados para a obtenção de dados da interação da radiação eletromagnética com diversos componentes do planeta Terra (Novo, 1998). No sensoriamento remoto a coleta de dados ocorre a distância, sem que haja a necessidade do cientista estar presente.

A radiação eletromagnética é a energia proveniente do sol que se propagada em forma de ondas. Os sensores ópticos são sensíveis a determinados comprimentos de onda ou bandas do espectro eletromagnético. Eles são capazes de coletar a energia emitida ou refletida de um alvo e transformá-la em sinal possível de ser registrado e interpretado (Novo, 1998). A maioria dos sensores opera na faixa de 380 a 15000 nm, que é dividida em região do visível, infravermelho próximo, médio e termal (Figura 4).

A luz visível, capaz de ser percebida pelo olho humano, está compreendida na faixa do espectro eletromagnético de 380 a 700 nm. O infravermelho próximo está na faixa de 700 a 1100 nm, o médio de 1100 a 3000 nm e o termal ou distante de 3000 a 10000 nm (Moreira, 2007). As diversas faixas ou comprimentos de onda do espectro eletromagnético são regiões que possuem características próprias em termos de interação com o meio. Por exemplo, de acordo com Guyot et al. (1989), devido às características estruturais das folhas e efeitos fenológicos do dossel, a região do infravermelho próximo é altamente refletida pela vegetação.

Quando a radiação eletromagnética entra em contato com a atmosfera ela pode ser absorvida, espalhada ou transmitida. Gases como o oxigênio, ozônio, gás carbônico e o próprio vapor d'água realizam a absorção de determinados comprimentos de onda, no fenômeno conhecido como absorção seletiva. A fração da radiação que incide sobre as plantas também é passível de sofrer esses três processos: absorção, reflexão e transmissão

(Figura 5). De acordo com Moreira (2007), 50% da radiação incidente é absorvida pelos pigmentos das folhas, uma segunda parte é refletida e a terceira parte é transmitida através das diversas camadas que compõem a folha. De acordo com esse mesmo autor, a energia refletida pela vegetação é a utilizada nos sistemas sensores.



**Figura 4.** Espectro eletromagnético

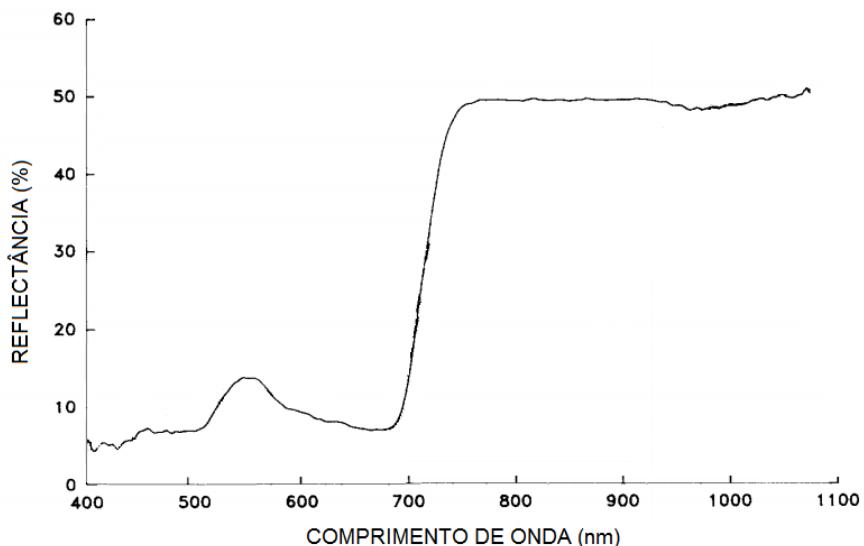
Fonte: Ferreira (2006).



**Figura 5.** Energia solar ( $I$ ) incidente sobre a vegetação e os processos de interação: (A) absorção, (R) reflexão e (T) transmissão (Fonte: Moreira, 2007)

O balanço de energia, resultante dos três processos de interação, está relacionado com as características da superfície das folhas e com as características internas do vegetal. A refletância dos vegetais varia de acordo com o comprimento de onda. Na

região do visível a refletância é menor. De acordo com Shimabukuro et al. (1998), a baixa refletância das folhas na região do visível se deve a presença de pigmentos fotossintéticos que absorvem grande parte dessa faixa da radiação solar (Figura 6).



**Figura 6.** Reflectância espectral da folha do feijoeiro em diferentes comprimentos de onda (Adaptado de Malthus & Madeira, 1993)

A região do espectro após a faixa da luz visível apresenta alta reflectância, devido ao espalhamento da radiação (reflectância e transmitância) no interior das folhas. A quantidade de folhas e a arquitetura do dossel também contribuem diretamente para a variação da refletância dos vegetais, assim como a idade das folhas. Folhas novas refletem mais energia que folhas velhas (Wang et al., 2001).

Na Figura 6 é possível observar que há grande diferença entre as reflectâncias na banda do infravermelho próximo e do vermelho. Gitelson et al. (2002b) observaram que na região do verde a absorção da luz pela clorofila é sempre menor que 6%, quando comparada ao azul e ao vermelho. Malthus & Madeira (1993) demonstraram que havendo danos aos tecidos das folhas, reduz-se a fotossíntese e há um aumento da absorção na região verde. Porém, nessa situação ocorre a diminuição da absorção na região do azul e vermelho. Isso demonstra que a estrutura celular e as condições sanitárias das plantas também interferem na absorção dos comprimentos de luz. As reflectâncias dos principais comprimentos de onda utilizados no sensoriamento remoto, em diferentes tipos de cobertura vegetal, são apresentadas na Tabela 1.

A quantidade de energia refletida e absorvida pode diferir de uma espécie para outra e dentro da mesma espécie, devido à idade, estado nutricional, *status* hídrico,

poluição do ambiente e outros (Williams, 1991). Apesar dessa complexidade, tem-se conseguido importantes relações entre as propriedades espectrais e as características biofísicas das comunidades vegetais.

**Tabela 1.** Reflectância média de vários tipos de biomas (Adaptado de Wang et al., 2001)

| Banda espectral       | BIOMA            |          |         |                    |                        |
|-----------------------|------------------|----------|---------|--------------------|------------------------|
|                       | Gramas e Cereais | Arbustos | Savanas | Florestas folhosas | Florestas de coníferas |
| μm                    |                  |          |         |                    |                        |
| Vermelho              | 0,104            | 0,087    | 0,083   | 0,058              | 0,042                  |
| Infravermelho próximo | 0,244            | 0,227    | 0,245   | 0,286              | 0,255                  |
| Azul                  | 0,049            | 0,038    | 0,050   | 0,047              | 0,027                  |
| Verde                 | 0,090            | 0,078    | 0,082   | 0,073              | 0,059                  |
| NDVI                  | 0,409            | 0,477    | 0,503   | 0,670              | 0,713                  |

Com o uso do sensoriamento remoto é possível identificar as espécies e genótipos cultivados (Goel & Reinolds, 1989), monitorar o índice de área foliar, fitomassa produzida, concentração de clorofila nas folhas e radiação fotossinteticamente ativa absorvida e refletida pelo dossel da cultura (Epiphanio et al., 1996). Assim, o estado fisiológico da planta e sua sanidade também podem ser diagnosticados a partir de sua reflectância (Malthus & Madeira, 1993; Almeida et al., 2009). Diversos modelos de estimativa de produtividade também utilizam os dados de sensoriamento remoto como variáveis de entrada.

## 2.5 RADIOMETRIA DE CAMPO

A possibilidade de usar o sensoriamento remoto no estudo de grandes áreas é uma de suas principais vantagens (Wright et al., 2004). Entretanto, esse método pode proporcionar elevado grau de incerteza às estimativas, devido aos ruídos causados pela presença de nuvens, efeitos atmosféricos causados por gases e aerossóis e problemas relacionados aos próprios sensores. Meyer et al. (1995) relatam que os efeitos atmosféricos produzem contribuições aditivas e subtrativas as faixas do espectro eletromagnético visível e infravermelho próximo. Segundo Justice et al. (1991), o ozônio e o vapor d'água são os gases que mais absorvem as faixas do espectro eletromagnético do visível e infravermelho.

De acordo com Moreira (2007), os sensores terrestres são usados para se obter dados espectrais em nível de solo. O principal uso da radiometria de campo é o monitoramento das condições hídricas, nutricionais, sanitárias e estimar parâmetros biofísicos da vegetação. De acordo com Huete (1997), a radiometria de campo também possibilita as informações básicas para a calibração e entendimento dos dados obtidos por sensores a bordo de satélites. Tal fato decorre da ausência dos efeitos indesejados dos ruídos atmosféricos na superfície do solo.

No sensoriamento remoto convencional, com sensores a bordo de satélites, as limitações se relacionam às suas resoluções espaciais, espectrais, radiométricas e temporais (Thenkabail et al., 2000). Deering (1980) e Epiphanio (1989) relatam que a radiometria de campo apresenta a vantagem de se poder realizar um maior número de medidas ao longo do ciclo da cultura, permitindo melhor acompanhamento da interação das plantas com o ambiente. Pearlman et al. (2003) relatam que a detecção de maior quantidade de faixas do espectro eletromagnético (alta resolução espectral) confere aos sensores de campo melhor acurácia e precisão nas estimativas. De acordo com Ponzoni & Shimabukuro (2010), os novos sensores orbitais hiperespectrais, em comparação com os multiespectrais, são os que mais se assemelham aos sensores de campo.

O sensoriamento remoto se dividiu em dois com o avanço das tecnologias: sensoriamento multiespectral e hiperespectral. No sensoriamento hiperespectral é possível obter as informações de centenas de bandas de forma contígua, aumentando a precisão das informações. Já no sensoriamento multiespectral os sensores trabalham com números limitados de bandas, o que não permite detectar oscilações e diferenças dentro dos intervalos do espectro eletromagnético (Breunig, 2011).

Os sistemas sensores foram classificados por Steffen et al. (1981) quanto ao tipo de produto, funcionamento e fonte de energia. Os produtos podem ser fotográficos e não fotográficos. O funcionamento pode ser imageador e não imageador. Quanto à fonte de energia, os sensores são ativos quando possuem fonte própria (*flash* fotográfico) ou passivos, quando utilizam fonte externa, como a luz do sol. O sensor Crop Circle ACS-430, utilizado nesse estudo, apresenta produto não fotográfico, de funcionamento não imageador e ativo quanto à sua fonte de energia.

## 2.6 ÍNDICES DE REFLECTÂNCIA

Epiphanio et al. (1996) relatam que, apesar da complexidade envolvida nos parâmetros espectrais, têm-se conseguido importantes relações entre eles e as propriedades biofísicas da vegetação. São propriedades biofísicas da vegetação: o índice de área foliar, a fitomassa, a porcentagem de cobertura do solo, a concentração de clorofila e a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel. Essas são importantes informações sobre áreas vegetadas, com as quais é possível monitorar e predizer seu comportamento no ambiente.

As propriedades espectrais da vegetação podem ser representadas de diversas formas. Na mais simples a resposta é representada por uma banda única, por exemplo, a reflectância apenas do infravermelho próximo. Entretanto, as reflectâncias individuais de cada banda podem ser agrupadas de maneira específica, dando origem aos índices de vegetação ou de reflectância. Devido ao comportamento peculiar de cada comprimento de onda do espectro eletromagnético ao interagir com as plantas, quando se combina bandas é possível detectar maiores informações. Isso ocorre, segundo Epiphanio & Formaggio (1991), porque os índices de vegetação realçam o componente espectral da vegetação. Os principais agrupamentos são as somas, diferenças, razões, normalizações, distâncias no espaço cartesiano e suas variantes.

Segundo Huete et al. (1994), a utilização dos índices de vegetação minimiza os efeitos indesejáveis da interferência da reflectância do solo ou dos ruídos atmosféricos. Isso ocorre devido à maior sensibilidade dos índices de vegetação ao se relacionarem com os parâmetros biofísicos da vegetação, quando comparados ao uso das bandas individuais (Asrar et al., 1984). Erros provenientes de variações no substrato abaixo do dossel, da declividade do terreno, do ângulo solar e do ângulo de visada, também podem ser contornados com o uso dos índices de vegetação.

Os índices de vegetação, frequentemente utilizados para estimar parâmetros de vegetação, são provenientes da faixa do vermelho e infravermelho próximo. A banda do vermelho é altamente absorvida pelos pigmentos das folhas, já o infravermelho próximo é muito refletido pelo dossel (Gates et al., 1965). Diversos índices de vegetação também utilizam outras bandas do espectro eletromagnético. Porém, Baret et al. (1989) relataram que 90% da resposta espectral da vegetação pode ser explicada pelas bandas do vermelho e infravermelho próximo.

De acordo com Moreira (2007), os principais pigmentos responsáveis pela absorção da luz pelas folhas são as clorofilas, carotenoides, xantofilas e antocianinas. Carter (1994) e Jensen (2009) relataram que folhas sadias possuem grande reflectância na banda do infravermelho próximo, porém, quando há condições estressantes essa reflectância diminui. A redução da área foliar devido ao ataque de pragas ou doenças, déficit hídrico e a senescência da cultura são eventos que reduzem a reflectância nessa banda. De acordo com Shimabukuro et al. (1998), a alta reflectância do infravermelho próximo pelas folhas se deve ao seu espalhamento (reflectância e transmitância) no interior das folhas em função de sua estrutura celular.

Galvão et al. (2009) classificaram os índices de vegetação em quatro grupos, quanto ao que estão relacionados: a) aos pigmentos, b) ao conteúdo de água do dossel, c) à eficiência do uso da luz, e d) à borda vermelha ou *rededge*. A partir da reflectância de cada corpo e da resolução espectral do sensor, diversos índices podem ser calculados, os quais fornecem diferentes informações. Desta forma, a escolha de qual índice usar depende do objetivo e equipamento disponível. De acordo com esse mesmo autor os principais índices relacionados aos pigmentos da folha são: ARVI, EVI, NDVI, SR, CRI, VARI e VIg.

O ARVI (*Atmospherically Resistant Vegetation Index* - índice de vegetação resistente à atmosfera), proposto por Kaufman & Tanre (1992), é um índice que se altera pouco em virtude dos ruídos atmosféricos, sendo pouco afetado principalmente pela opacidade atmosférica. Essa melhora é obtida devido ao uso da banda do azul nos cálculos desse índice. Kaufman & Tanre (1992) recomendaram o uso desse índice principalmente em regiões em que os ruídos atmosféricos são maiores que os ruídos de solo.

O EVI (*Enhanced Vegetation Index* - índice de vegetação realçado), proposto por Huete et al. (1997), foi desenvolvido para melhorar o sinal da vegetação, pois também usa a reflectância da banda do azul. Esse índice reduz os ruídos do sinal de fundo do dossel e ruídos atmosféricos (Justice et al., 1998), embora seja influenciado pelo ângulo zenital solar (Galvão et al., 2011). Assim como o NDVI, o EVI apresenta grande potencial para discriminar diferentes culturas em extensas áreas (Wardlow et al., 2007).

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index* - índice de vegetação por diferença normalizada), proposto por Rouse et al. (1973), de acordo com Zhang et al. (2003), é um dos índices mais utilizados em escala local, regional e global. Isso decorre de sua capacidade em minimizar ruídos externos, como sombras de nuvens, quando obtido de

sensores orbitais. Sua maior sensibilidade à presença de pigmentos fotossintetizantes pode explicar esse efeito e sua ampla utilização (Gitelson et al., 1996).

O SR (*Simple Ratio* - razão simples), proposto Rouse et al. (1973), é o resultado da divisão dos valores de reflectância na banda do infravermelho próximo pela reflectância na banda do vermelho. Apesar da simplicidade desse índice, ele apresenta a mesma eficiência de outros índices para estimar o índice de área foliar das culturas (Monteiro et al., 2013).

O CRI (*Carotenoid Reflectance Index*) é um índice que se baseia no princípio de haver estreita relação entre os níveis de carotenoides e clorofitas durante o desenvolvimento, senescência, aclimatação e outros eventos, como o estresse das plantas (Gitelson et al., 2002a). Esse índice usa a reflectância nas faixas de 510, 550 e 700 nm. A partir da interação desses espectros podem ser calculados dois índices CRI. Com ele é possível determinar o conteúdo total de pigmentos nas folhas sem necessitar destruir a amostra.

O VARI (*Visible Atmospherically Resistant Index* - índice de vegetação resistente à atmosfera na região do visível) é um índice que considera as bandas do verde, vermelho e azul para descrever o comportamento da vegetação. Esse índice foi proposto por Gitelson et al. (2002b) a partir dos conceitos do ARVI, desenvolvido por Kaufman & Tanre (1992). Existem variações desse índice que melhoraram seus resultados, outra vantagem desse índice é o fato de ele não se saturar (Gitelson et al., 2002b), como ocorre com o NDVI.

O VIg (*Visible Green Index* - índice do verde no espectro visível) também utiliza bandas da região do visível, verde e vermelho. É calculado com a subtração da reflectância do verde pela reflectância do vermelho, dividida pela soma da reflectância dessas duas bandas. Assim como o ARVI, esse índice não se satura como o NDVI (Gitelson et al., 2002b)

Atualmente tem-se estudado a eficiência desses índices na determinação das características fisiológicas e de desenvolvimento das culturas, por se apresentarem como uma forma rápida de aquisição de dados e amostragem não destrutível (Ramos, et al., 2010). Porém, de acordo com Tanajura et al. (2005), esses índices podem ser diferentemente afetados pelo substrato abaixo do dossel e outros fatores. Isso culmina na necessidade de estudos que identifiquem quais as limitações, potencialidades e em quais situações podem ser melhor utilizados.

## 2.7 ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI)

Devido ao comportamento espectral da vegetação em absorver a energia incidente na faixa do vermelho e refletir grande parte da energia na faixa do infravermelho próximo, essas duas bandas são utilizadas nos diversos índices de vegetação. O NDVI é o resultado entre medidas espectrais (reflectância -  $\rho$ ) dessas duas bandas, sendo o somatório da reflectância do infravermelho próximo (700 a 1300 nm) e a reflectância do vermelho (600 a 700 nm), dividido pela soma das duas reflectâncias. Esse índice foi proposto por Rouse et al. (1973) com a finalidade de quantificar o crescimento e a biomassa acumulada da vegetação. Seus valores variam de +1 a -1. Quanto maior seu valor positivo, maior é o vigor de crescimento da cultura. O cálculo do NDVI é descrito na equação 1.

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

Sendo,

$\rho_{\text{IVP}}$  - reflectância obtida na faixa do infravermelho próximo, em nanômetros ou micrometros; e

$\rho_{\text{V}}$  - reflectância obtida na faixa do vermelho, em nanômetros ou micrometros.

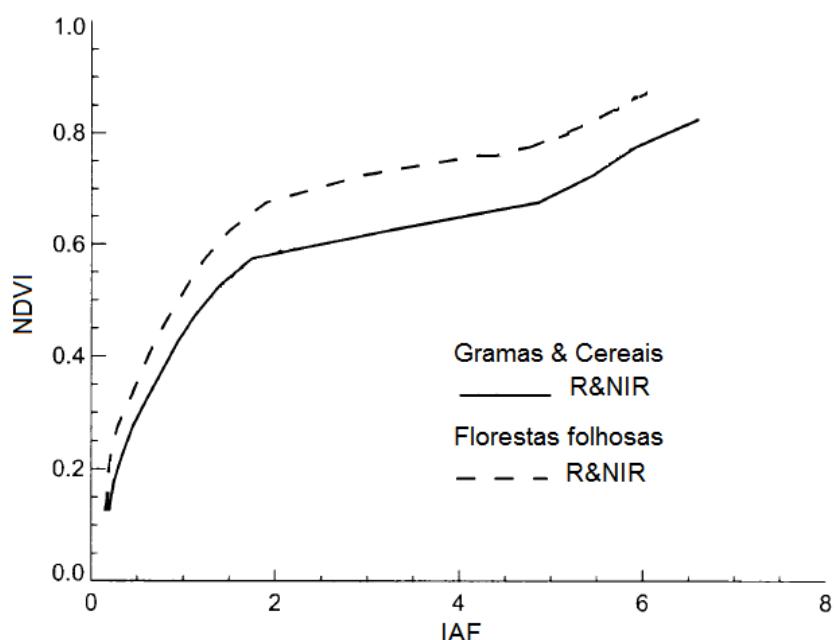
Segundo Moise et al. (2010), entre 2 e 10% da radiação incidente na faixa do visível é refletida pelos tecidos vegetais, já na faixa do infravermelho de 35 a 60% da radiação é refletida. Assim, ao se utilizar o NDVI se obtém o máximo contraste entre as propriedades das folhas, permitindo caracterizar melhor o vigor da vegetação (Gurgel et al., 2003). Tais informações são corroboradas por Tucker (1979), que demonstrou que determinados comprimentos de onda são superiores para discriminar algumas características da vegetação. Esse índice possibilitou contornar, dentro de certos limites, o problema da interferência do solo na resposta da vegetação, a influência da atmosfera e das variações sazonais do ângulo zenital solar (Silva Neto et al., 2008).

Em modelos agrometeorológicos-espectrais a produtividade de diversas culturas pode ser estimada a partir de dados agrometeorológicos e de seus índices de área foliar. Esse índice de área foliar pode ser calculado a partir do NDVI obtido em sensores orbitais ou terrestres. Em comparação aos modelos agrometeorológicos convencionais, que

utilizam apenas dados climáticos, os modelos agrometeorológicos-espectrais apresentam maior qualidade nas estimativas.

De acordo com Rosa et al. (2010), em modelos agrometeorológicos convencionais se torna difícil fazer ajustes quanto à idade da lavoura (em culturas perenes), tipo e fertilidade do solo, sistemas de manejo, espaçamentos, distinguir genótipos, entre outros. Epiphanio et al. (1996) afirmam que os índices de vegetação têm por finalidade aumentar a quantidade de informações relacionadas à vegetação e ao uso do solo. Desta forma, com o uso dos valores espectrais da cultura é possível caracterizá-las melhor.

Em condições de elevado índice de área foliar o NDVI se torna pouco sensível para detectar variações na biomassa, fenômeno conhecido com saturação assintótica (Risso et al., 2012). Esse fato é especialmente prejudicial às estimativas de produção, pois a não detecção no aumento da biomassa gera erros ao se predizer a produtividade da cultura (Huete et al., 2002; Povh et al., 2008). Tal fato sugere que o NDVI deve ser calibrado para cada condição de cultivo e espécie vegetal. Esse comportamento foi demonstrado por Wang et al. (2001), conforme a Figura 7. Observa-se que a partir de determinado valor de IAF há pouco alteração no NDVI, nesse momento é dito que houve a saturação.



**Figura 7.** Comportamento do NDVI em função da área foliar de diferentes coberturas vegetais (Adaptado de Wang et al., 2001)

Povh et al. (2008), estudando o comportamento do NDVI nas culturas do trigo, triticale, cevada e milho, chegaram à conclusão que o NDVI apresenta baixo potencial para

o manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho. Para essa cultura houve saturação do NDVI desde a primeira leitura. Para as outras culturas o NDVI apresentou alto potencial de manejo.

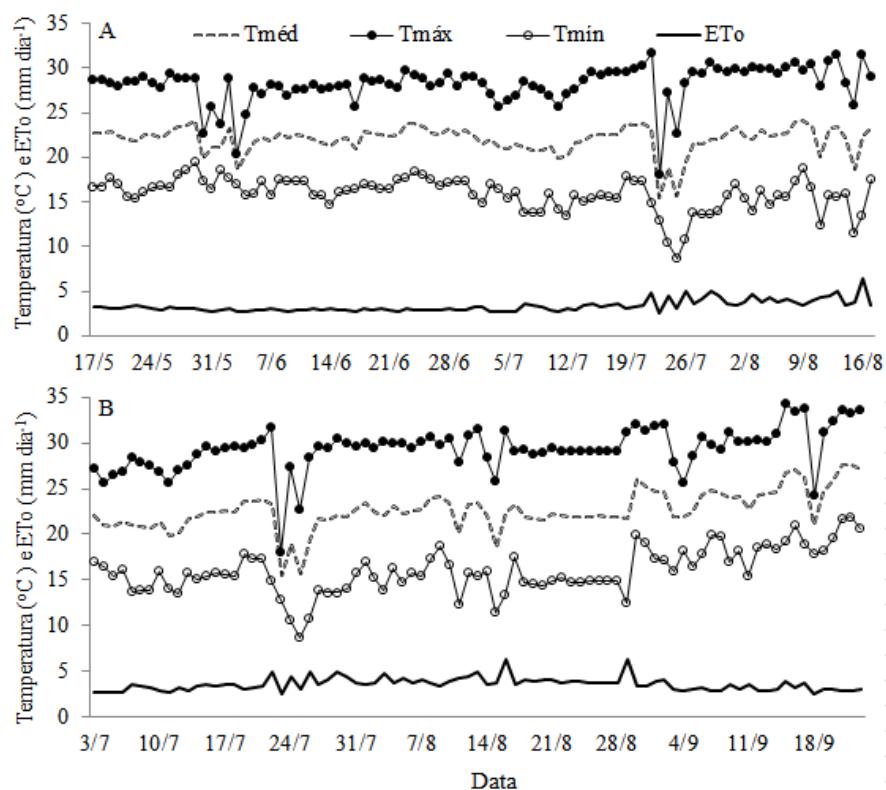
Em condições de baixa cobertura vegetal o NDVI sofre alteração em seus valores, em virtude da interação da radiação eletromagnética com o solo. Assim, deve-se ter atenção nas fases iniciais da cultura, pois os valores de NDVI podem não refletir seu comportamento real. Em solos mais claros o NDVI é menor que em solos escuros (Epiphanio et al., 1996). Os solos escuros apresentam baixa reflectância do vermelho, tanto dos raios que incidem diretamente, quanto dos transmitidos pela cultura. Esse fato é especialmente importante porque o NDVI é mais sensível à banda do vermelho que do infravermelho, de acordo com Epiphanio & Huete (1995).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

##### 3.1.1 Local e clima

O experimento foi conduzido em campo, na Embrapa Arroz e Feijão, fazenda Capivara, localizado no município de Santo Antônio de Goiás (latitude 16°40' Sul, longitude 49°15' W e altitude de 823 metros). Segundo a classificação climática de Köppen (Alvares et al., 2013), o clima da região é Aw (tropical de savana), com inverno seco e verão chuvoso, com período de déficit hídrico de maio a outubro. A temperatura média, máxima e mínima do ar e a evapotranspiração de referência observadas durante a condução do experimento, obtidos na estação meteorológica da Embrapa Arroz e Feijão, situada próxima à área experimental, estão ilustradas na Figura 8.



**Figura 8.** Temperatura média, máxima e mínima e evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) durante o desenvolvimento do estudo, A) semeadura em 17/05/2013 e B) semeadura em 03/07/2013, em Santo Antônio de Goiás-GO

O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho ácrico (Embrapa, 2006), cuja camada superficial (0-0,2 m) apresentou as seguintes características físicas e químicas: textura argilosa; densidade do solo de  $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ ; pH em água de 6,0;  $17 \text{ g dm}^{-3}$  de matéria orgânica;  $5,7 \text{ mg dm}^{-3}$  de P;  $0,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de K;  $2,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de Ca;  $0,9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de Mg;  $3,9 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de acidez potencial;  $6,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de CTC a pH 7,0 e saturação por bases de 50%.

### **3.1.2 Arranjo experimental e semeadura**

Utilizou-se o arranjo experimental de blocos ao acaso em esquema fatorial  $2 \times 4$ , duas datas de semeadura e quatro genótipos, com quatro repetições. As datas de semeadura foram 17/05/2013 e 03/07/2013. Os genótipos utilizados foram: BRS Pérola, Bat 477, BRS Pontal e BRS Agreste. Em cada data as cultivares foram semeadas em quatro parcelas de  $36,0 \text{ m}^2$ , constituídas de 10 linhas.

Utilizou-se o sistema de semeadura direta. A fim de se formar cobertura vegetal sobre o solo para o cultivo do feijão, anteriormente à sua semeadura foi semeado milheto (*Penisetum americanum*, L.). A cultura do milheto foi dessecada com o herbicida *gliosato* ( $4,0 \text{ L ha}^{-1}$ ), 15 dias antes da semeadura do feijão. A semeadura do feijão foi realizada com semeadora-adubadora equipada para plantio direto. O espaçamento entre linhas foi de 0,45 m, com profundidade de semeadura de 0,03 a 0,04 m. A densidade de semeadura foi de aproximadamente 15 sementes por metro, de acordo com o índice de TPG (Teste Padrão de Germinação) das cultivares, obtendo-se uma população de 200 a 250 mil plantas por hectare. Concomitante à semeadura foi realizada a adubação de base, na qual se aplicou  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  de N,  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ , utilizando o adubo formulado 5-30-15, na dose de  $400 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Antes da semeadura foi realizado o tratamento de sementes com Cruiser 350 FS (*Thiamethoxam*), inseticida sistêmico do grupo químico dos neonicotinóides. Na cultura do feijoeiro é utilizado contra o ataque de mosca branca (*Bemisia tabaci* raça B) e vaquinha (*Diabrotica speciosa*), de acordo com Andrei (1999). As sementes também foram tratadas com Vitavax-Thiram 200 SC (*Carboxina e Tiram*), fungicida sistêmico e de contato. Tal tratamento foi utilizado na prevenção da podridão-radicular, tombamento (*Rhizoctonia solani*) e antracnose (*Colletotrichum lindemuthianum*), segundo Andrei (1999).

### 3.1.3 Tratos culturais

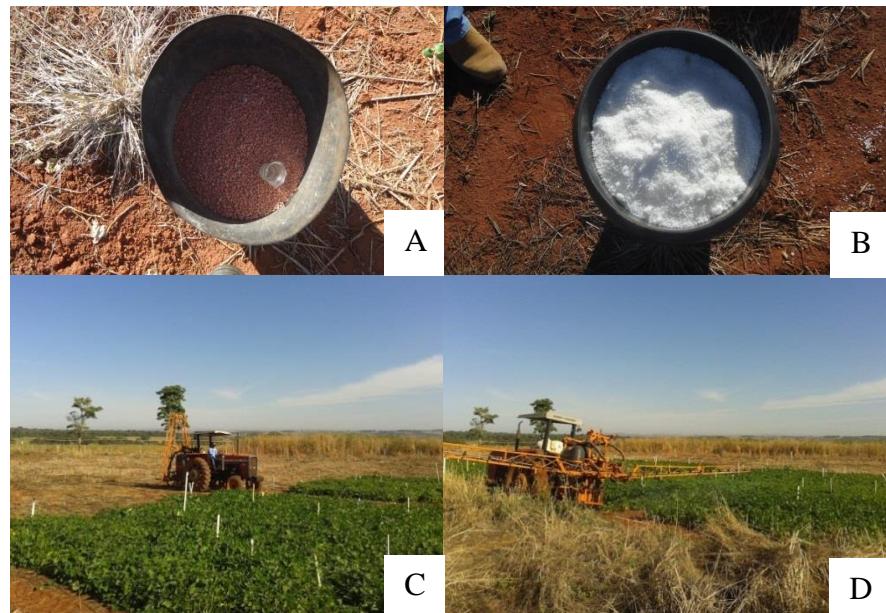
A primeira adubação de cobertura foi realizada no início do estádio V3 (primeira folha trifoliolada completamente expandida), com aplicação de 30 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de ureia e Aminosan na dose de 1,0 L ha<sup>-1</sup> (fertilizante foliar organomineral). A segunda adubação de cobertura foi feita no final do estádio V4 (três folhas trifolioladas completamente expandidas), na qual se aplicou nas entrelinhas 50 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de ureia e 30 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O na forma de cloreto de potássio (KCl). Nesta adubação também se aplicou Aminosan (1,5 L ha<sup>-1</sup>).

O controle de plantas daninhas foi feito aos 15 dias antes da semeadura para a dessecação da área. Foi aplicado o herbicida *gliosato* (4,0 L ha<sup>-1</sup>). Após a semeadura foram realizadas mais duas aplicações de herbicidas: a primeira aplicação ocorreu aos 19 dias usando os herbicidas Amplo (*Bentazona* e *Imazamoxi*) na dose de 1,0 L ha<sup>-1</sup> e Verdict R (*Haloxifope-R éster metílico*) na dose de 0,5 L ha<sup>-1</sup>, para o controle de plantas daninhas de folhas estreitas; e a segunda aplicação foi realizada aos 21 dias, utilizando o herbicida Flex (1,0 L ha<sup>-1</sup>) para controle das plantas infestantes de folha larga, Verdict R (0,75 L ha<sup>-1</sup>).

Aos 15 dias após a semeadura foi aplicado o inseticida fisiológico Tiger 100 EC (*Piriproxifem*) na dose de 0,25 L ha<sup>-1</sup> para controle de mosca branca (*Bemisia tabaci*). Um mês após a semeadura foi realizada a segunda aplicação, utilizando-se o inseticida Actara 250 WG (*Tiametoxam*) na dose de 0,150 kg ha<sup>-1</sup> para controle da cigarrinha verde (*Empoa scakraemerii*) e vaquinha (*Diabrotica speciosa*). O controle fúngico foi realizado com a aplicação de Carbendazin na dose de 0,5 L ha<sup>-1</sup>, para combate à antracnose (*Colletotrichum Lindemuthianum*). As atividades realizadas nos principais tratos culturais estão apresentas na Figura 9.

A irrigação foi realizada pelo sistema de aspersão convencional (Figura 10). O manejo foi efetuado por meio de quatro baterias de tensiômetros instalados nas profundidades de 10, 25 e 40 cm. Segundo Pires et al. (1991), para fins de controle da irrigação, pode-se considerar que a profundidade efetiva do sistema radicular do feijoeiro comum se encontra entre 25 e 30 cm. A irrigação era feita sempre que a tensão da água no solo atingia 30 kPa, modo a repor a umidade do solo à capacidade de campo, de acordo com Moreira (1999). Foram utilizados os coeficientes de cultura de acordo com Steinmetz (1984): 0,69 da germinação à floração, 1,28 para a floração e 1,04 para o desenvolvimento

e maturação das vagens. A evapotranspiração foi determinada pelo método de Penman-Monteith-FAO (Allen et al., 1998).



**Figura 9.** Tratos culturais realizados, A) adubação com cloreto de potássio, B) adubação com ureia C) aplicação de herbicidas e D) aplicação de inseticidas



**Figura 10.** A) Irrigação por aspersão, B) com manejo da umidade do solo realizado por tensiômetros

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS CULTIVARES

A cultivar Pérola possui hábito de crescimento indeterminado (entre os tipos II e III), com porte semiereto, ciclo de 90 dias, média de 46 dias para floração, com flor branca, com vagem levemente rosada na maturação e vagem amarelo-areia na colheita.

Classificado no grupo comercial carioca, o grão da cultivar Pérola é de cor bege-clara, com rajas marrom-claras, brilho opaco e massa de 100 sementes de 0,027 kg. A qualidade do grão se assemelha a das cultivares Aporé e Carioca, especialmente quanto ao tempo de cozimento. Essa cultivar, comparada às demais do mesmo grupo, produz grãos maiores, o que lhe confere excelente aspecto visual.

A cultivar Pérola apresenta resistência à ferrugem e ao mosaico-comum. Em condições de campo ela é moderadamente resistente à murcha de Fusarium e à mancha angular. Quanto à antracnose, ela possui resistência à raça alfa-brasil TUS e suscetibilidade às raças alfa-brasil, kapa e zeta (Yokoyama et al., 1999).

A cultivar BRS Agreste possui porte ereto com boa resistência ao acamamento. É indicada para o cultivo nas safras das "água" e "inverno" em Goiás e no Distrito Federal e na safra das "água" em Sergipe, Bahia e Alagoas. Apresenta ciclo semiprecoce, com duração de 75 a 85 dias, momento em que pode se realizar a colheita. Possui flor de cor branca, cor da vagem na maturação variando de amarelo a levemente avermelhada e cor do grão bege sem brilho. Possui uniformidade de coloração e de tamanho de grãos. A massa média de 100 grãos é de 0,025 kg e tempo médio de cozimento de 32 minutos (Melo et al., 2008).

A cultivar BRS Agreste, sob inoculação artificial, é resistente ao mosaico-comum e aos patótipos 23, 55, 71, 89, 89-AS, 95, 127 e 453 de *Colletotrichum lindemuthianum*, agente causal da antracnose. Apresenta reação de suscetibilidade à mancha angular e ao mosaico-dourado (Melo et al., 2008).

A BRS Pontal é uma cultivar desenvolvida pela Embrapa Arroz e Feijão no ano de 2003. Ela possui tipo de grão comercial carioca, ciclo normal (85 a 95 dias), possui alto potencial produtivo ( $4.271 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e arquitetura de planta prostrada. É indicada para as safras das "água" em Goiás, Distrito Federal, São Paulo, Paraná, Santa Catarina, Sergipe, Minas Gerais, Bahia e Alagoas. Na safra de "inverno" é recomendada para os estados de Goiás, Minas Gerais Mato Grosso do Sul, Paraná, Santa Catarina e o Distrito Federal. Seu cultivo na época da "seca" é indicado para os estados de Goiás, Mato Grosso, São Paulo, Minas Gerais, Tocantins e Distrito Federal. A BRS Pontal apresenta resistência ao mosaico comum e antracnose, resistência intermediária ao crescimento bacteriano, fusarium e à ferrugem (Albrecht & Carvalho, 2006).

O genótipo BAT 477 tem boa adaptabilidade à condição de deficiência hídrica, apresentando bom grau de resistência à seca. Com esse genótipo Guimarães &

Ziemmermann (1985) obtiveram boa produtividade de grãos em condições de cultivo com deficiência hídrica. A presença de cutícula mais suberizada e a menor resistência hidráulica das raízes são os principais mecanismos desse genótipo que lhe conferem a característica de tolerância à seca (Guimarães, 1996).

### 3.3 INDICADORES FISIOLÓGICOS DO CRESCIMENTO

A determinação do índice de área foliar (IAF), matéria seca total de plantas (MST), matéria seca de colmo (MSC) e matéria seca de folha (MSF) foi realizada com a coleta de cinco plantas por metro, das quais se separou os caules e folhas. As coletas foram realizadas semanalmente durante o ciclo da cultura. Para a determinação da área foliar se utilizou o integrador de área foliar fotoelétrico LI-COR, modelo LI-3100 C (Figura 11). Logo após, as folhas e caules foram colocados em sacos de papel e secos em estufa a 65°C por 48 horas ou até atingirem massa constante. Uma vez secas, determinou-se a massa das amostras em balança de precisão.



**Figura 11.** Determinação da área foliar com o integrador de área foliar fotoelétrico LI-COR, modelo LI-3100 C

### 3.4 ÍNDICE DE REFLECTÂNCIA

As leituras do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) foram realizadas com o sensor radiométrico Crop Circle. As leituras foram realizadas passando o

sensor sobre as linhas de plantio, utilizando uma linha de plantas por parcela, totalizando quatro repetições por tratamento. Esse sensor realizava a coleta de 10 pontos por segundo, com velocidade de caminhamento de aproximadamente  $1,0 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 12). Visando diminuir a influência de fatores externos na aquisição dos dados, as leituras foram realizadas predominantemente no mesmo horário do dia.

O equipamento utilizado é um ótico ativo Crop Circle da *Holland Scientific*, modelo ACS – 430. Esse sensor é portátil, com frequência máxima de coleta de 10 dados por segundo. No momento da leitura a distância entre o sensor e a cultura era de aproximadamente 0,5 m.



**Figura 12.** Leitura dos índices de reflectância dos cultivares de feijão com o sensor radiométrico Crop Circle

### 3.5 EQUIPAMENTOS

#### 3.5.1 Integrador de área foliar LI-3100 C

Para determinar a área foliar foi utilizado o integrador de área foliar LI-COR, modelo LI-3100 C (Figura 13). Esse equipamento é eficiente na medição de uma grande variedade de folhas, que vão desde amostras maiores, como milho, tabaco e algodão, até amostras menores como folhas de gramíneas. Ele também pode ser utilizado com precisão na medição de folhas perfuradas e folhas com margens irregulares, o que pode ser útil na quantificação de danos foliares causados por ataques de insetos e por doenças.

Para medição da área foliar as amostras foram colocadas na parte inferior das guias transparentes (esteiras), de onde são levadas para a parte interna do equipamento. As folhas são prensadas por dois rolos, o que garante que o material não fique enrolado ou sobreposto no momento da leitura. Como a amostra é transportada sob uma fonte de luz

fluorescente de 15 watts, a imagem projetada é refletida para uma câmara de digitalização, composta por três espelhos, conferindo alta precisão nos resultados.



**Figura 13.** Integrador de área foliar LI-3100C

### 3.5.2 Sensor de luz Crop Circle ACS-430

O Crop Circle ACS-430 (Figura 14) é um sensor de luz única que pode medir a radiação refletida pelo dossel das plantas, detectando remotamente a biomassa da cultura. O sensor possui fonte de luz policromática, usada para iluminar o dossel das plantas. Assim, o equipamento emite simultaneamente luz visível e na banda do infravermelho próximo. Essa combinação de luzes imita a composição da luz natural, conferindo resultados próximos às reais condições do ambiente.



**Figura 14.** Sensor de luz Crop Circle ACS-430 utilizado para a medição do NDVI do feijoeiro, em Santo Antônio de Goiás-GO

O Crop Circle ACS-430 faz a leitura da reflectância em três faixas simultaneamente: 670 nm, 730 nm e infravermelho próximo. Quando a luz visível e na região do infravermelho próximo são emitidas pelo sensor e dirigidas ao dossel da planta,

parte da luz é refletida pelas plantas e captada pelo sensor por uma matriz de fotossensores, capazes de reconhecer diferentes bandas. O ACS-430 é capaz de distinguir a luz que ele próprio emitiu da luz do ambiente circundante, o que permite realizar medições de reflectância dos dosséis de plantas em qualquer condição de iluminação do ambiente: céu nublado, sol pleno, completa escuridão ou iluminação artificial (Gong et al., 2003). A reflectância captada pelo sensor é então utilizada pelo equipamento para fazer os cálculos dos índices de vegetação.

### 3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise de regressão é uma técnica estatística que investiga e modela relações entre variáveis. Aplicações de regressão são inúmeras e ocorrem em quase todo campo, incluindo engenharia, ciências químicas e físicas, economia, administração, ciências biológicas e ciências sociais. A análise de regressão pode ser considerada a técnica estatística mais amplamente utilizada (Montgomery, 2012). Desta forma, foi aplicado o método regressão linear simples, na qual procurou-se explicar as variáveis IAF, MSC, MST e MSF por meio da variável NDVI.

Como neste estudo houve duas datas de semeadura (data I e II, 17/05/2013 e 03/07/2013, respectivamente), com quatro genótipos em cada data (BRS Pérola, Bat 477, BRS Pontal e BRS Agreste), foi aplicada a regressão linear para cada genótipo em cada uma das datas. Posteriormente, reuniram-se os dados de cada genótipo nas duas datas e, por fim, reuniram-se todos os genótipos e todas as datas de semeadura. Formaram-se assim 13 conjuntos de dados para cada uma das variáveis, totalizando 52 análises de regressão.

Nos modelos de regressão linear simples devem ser obedecidos os seguintes pressupostos: i) a variável resposta Y é função linear da variável explicativa X, ii) os erros são independentes, iii) os erros são homocedásticos (variância constante), iv) os erros tem distribuição normal. Quando isso não ocorre, dentre algumas formas, pode-se transformar a variável resposta para que os pressupostos sejam obedecidos. Alguns modelos precisaram de transformação, os quais são indicados nas equações dos gráficos como “(y)” e, quando não houve transformação, simplesmente por “y”.

Das 52 regressões apenas nove precisaram de transformação no modelo. As transformações foram realizadas por meio da família de transformação de Box-Cox (Peltier et al., 1998). De acordo com os autores, a transformação de Box-Cox é um método simples

que pode permitir a análise de um conjunto de dados com heterogeneidade de variâncias e não normal de modo que os pressupostos da ANOVA possam ser satisfeitos. Em casos no qual mesmo transformando a variável resposta os pressupostos não eram atendidos, utilizou-se o método de regressão linear robusto e o ponderado. O método ponderado foi aplicado no caso dos resíduos não serem heterocedásticos (variância não constante). Esses dois métodos apenas diferem do método comum por utilizar novos critérios de estimação dos parâmetros da regressão.

A transformação Box-Cox consiste em transformar os dados de acordo com a expressão  $(y) = (y^{\lambda}-1)/\lambda$ , onde  $\lambda$  (lambda) é um parâmetro a ser estimado dos dados e  $y$  a variável resposta. Se  $\lambda = 0$ , a expressão anterior se reduz a  $(y) = \log(y)$ . Dependendo do valor de  $\lambda$  a transformação Box-Cox inclui os seguintes casos especiais (sendo  $x_i$  os dados observados):

- $\lambda = -1,0$ ;  $y_i(\lambda) = 1/y_i$ ;
- $\lambda = -0,5$ ;  $y_i(\lambda) = 1/\sqrt{y_i}$ ;
- $\lambda = 0,0$ ;  $y_i(\lambda) = \log(y_i)$ ;
- $\lambda = 0,5$ ;  $y_i(\lambda) = \sqrt{y_i}$ ; e
- $\lambda = 0,2$ ;  $y_i(\lambda) = y_i^2$ ;

Quando  $\lambda = 1$  nenhuma transformação é sugerida, pois assim seria  $(y) = y - 1$  que é uma reta, o que não muda significativamente a variável original. Nesse caso, quando nenhuma transformação resulta em normalidade ou homogeneidade da variância, outra alternativa possível é utilizar regressão robusta. Dessa forma, utilizando a função Box-Cox do software R, que calcula o valor do parâmetro  $\lambda$  e seu intervalo de confiança, obteve-se as transformações descritas na Tabela 2.

**Tabela 2.** Modelos que apresentaram transformação na análise estatística dos dados

| MODELO     | VARIÁVEL | DATA   | GENÓTIPO | VALOR DE $\lambda$ | TRANSFORMAÇÃO             |
|------------|----------|--------|----------|--------------------|---------------------------|
| Figura 17c | IAF      | I      | Pérola   | 0                  | $\log(y)$                 |
| Figura 18d | IAF      | I + II | Pontal   | 0                  | $\log(y)$                 |
| Figura 19  | IAF      | I + II | AGD      | 0,2                | $(y^{\lambda}-1)/\lambda$ |
| Figura 21c | MST      | I + II | Pérola   | 0                  | $\log(y)$                 |
| Figura 22  | MST      | I + II | -        | 0,2                | $(y^{\lambda}-1)/\lambda$ |
| Figura 24a | MSC      | I + II | Agreste  | 0,5                | $\sqrt{y}$                |
| Figura 25  | MSC      | I + II | AGD      | 0,2                | $(y^{\lambda}-1)/\lambda$ |
| Figura 26h | MSF      | II     | Pontal   | 1                  | Regressão Robusta         |
| Figura 28  | MSF      | I + II | AGD      | 0,65               | Regressão Ponderada       |

$y$  = variável resposta;  $\lambda$  = lambda calculado pela função Box-Cox; I = data I de semeadura; II = data II de semeadura; AGD= agrupamento de genótipos e datas de semeadura.

A performance dos modelos foi avaliada de acordo com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a raiz do erro quadrático médio (RMSE, *root mean square error*), o erro médio absoluto (MAE, *mean absolute error*), o coeficiente de eficiência do modelo de Nash e Sutcliffe ( $EF$ ) e o coeficiente de concordância de Willmott ( $d$ ), de acordo com as equações 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente.

$$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (4)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (6)$$

Sendo,

$O_i$  = valores observados;

$P_i$  = valores preditos;

$\bar{O}$  = valor médio dos valores observados;

$\bar{P}$  = valor médio dos valores preditos; e

$n$  = número de observações.

De acordo com Gujarati & Porter (2010), a avaliação dos modelos apenas pelo coeficiente de determinação deve ser realizada com bastante cautela e sempre que possível

avaliada juntamente com outros critérios. O coeficiente de determinação avalia apenas a precisão do modelo ou o grau de dispersão dos valores em torno da média (reta de ajuste). Willmott et al. (1985) sugerem que o índice de correlação  $R^2$  deve ser substituído por medidas mais precisas, como o índice  $d$  e o RMSE.

O RMSE é uma medida de incerteza do modelo, ele informa o tamanho médio do erro produzido. Quanto mais bem ajustado é o modelo menor o erro, levando a um menor soma de quadrados do erro e logo do RMSE. Ele apresenta a mesma unidade dos dados observados, assim, só pode ser usado para comparações dentro da mesma variável dependente. Foi calculado de acordo com Willmott (1981).

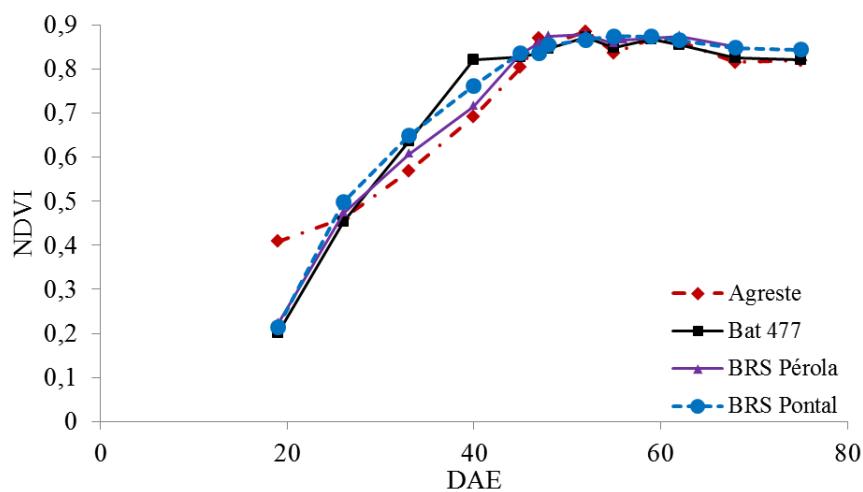
A eficiência do modelo foi avaliada de acordo com Nash e Sutcliffe (1970). Esse coeficiente varia de menos infinito a 1,0. Ele expressa a proporção do desvio total entre os valores observados e simulados oriunda do desvio total entre os valores observados e sua média. Quando o valor é 1,0 indica o perfeito ajuste do modelo entre previsões e observações. É interpretado como a tendência da redução proporcional da variação dos valores esperados do modelo em relação ao valor médio observado.

De acordo com Willmott (1981), o coeficiente de concordância de Willmott mede o grau de precisão em que os valores observados são estimados pelo modelo. Ele mensura o grau em que os valores preditos pelo modelo são livres de erro. Esse índice varia de 0,0 a 1,0, para o qual o valor 1,0 significa a perfeita concordância entre os valores observados e preditos e o valor 0,0 significa completa discordância. Entretanto, de acordo com o mesmo autor, esse coeficiente pode mascarar a qualidade do ajuste, pois apresenta erros, os quais são influenciados pela magnitude do desvio-padrão dos valores observados ou dos preditos. Já para Krause et al. (2005), um dos inconvenientes do coeficiente de concordância de Willmott é que mesmo para modelos que tenham baixo ajuste, o valor do coeficiente  $d$  é geralmente acima de 0,65. Diversos autores citam que os coeficientes de avaliação de modelos  $R^2$  e  $d$  devem ser usados com cuidado e sempre acompanhados de outros índices, pois não conseguem discriminar o erro sistemático do modelo (Willmott, 1981; Legates & McCabe Jr, 1999; Krause et al., 2005). De acordo com Chai & Draxler (2014), o ideal é utilizar o conjunto de coeficientes RMSE e MAE.

## 4 RESULTADOS E DISCUSÃO

Nas Figuras 15 e 16 são apresentadas as séries temporais dos valores de NDVI em função dos dias após a emergência da cultura para as duas datas de semeadura. Observa-se que para as duas datas de semeadura o NDVI apresentou saturação aproximadamente aos 40 dias após a emergência, corroborando Riso et al. (2012). De acordo com esses autores, em condição de elevado índice de área foliar o NDVI se satura, tornando-se pouco sensível à detecção de variações da biomassa verde.

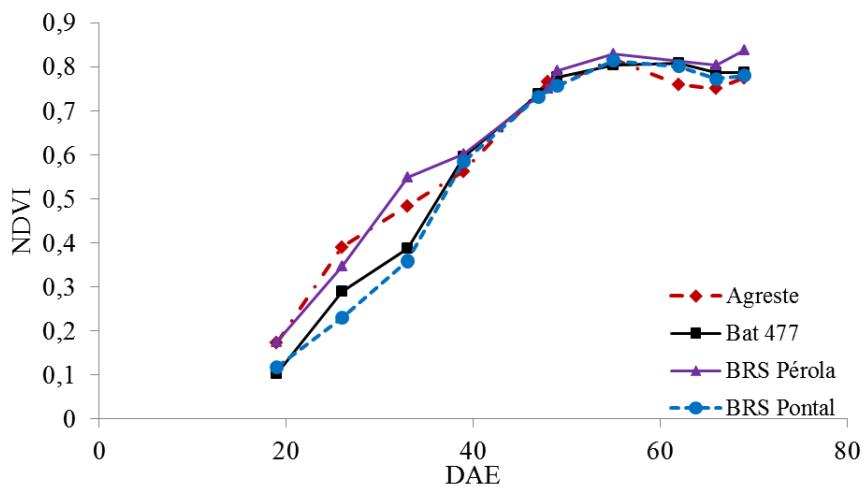
Na primeira data de plantio, após a saturação, o NDVI estabilizou-se em valores próximos a 0,85, enquanto que na segunda data de semeadura o valor estabilizado do NDVI saturado foi de aproximadamente 0,8. Mercante et al. (2010) encontraram para a soja valores máximos de NDVI saturado de 0,88. Na primeira data de semeadura o IAF máximo médio considerando os quatro genótipos foi de 3,94 aos 53 dias após a emergência da cultura, enquanto que na segunda data o IAF máximo médio foi de 2,37 aos 56 dias após a emergência.



**Figura 15.** Comportamento do NDVI em função dos dias após a emergência da cultura para a semeadura realizada em 17/05/2013 (primeira data de semeadura), em Santo Antônio de Goiás-GO

O menor valor de IAF para a segunda data de semeadura está relacionado a condições climáticas não ideais, como o aumento das temperaturas máxima e mínima

(Figura 8). Isso porque o experimento, em ambas as datas, foi conduzido de forma a minimizar os estresses bióticos e abióticos. O decréscimo no IAF também justifica valores menores do NDVI saturado nessa data. Quando ocorre a saturação do NDVI, além da menor eficiência em predizer o incremento de biomassa da cultura, Riso et al. (2012) também relatam que há confusão espectral entre os diferentes tipos de cobertura do solo, não sendo possível distingui-los com precisão. Como confusão espectral, os autores ressaltaram como exemplo o que ocorre entre as áreas de florestas e o cultivo de soja em pleno desenvolvimento, no Mato Grosso. Baseado nesses resultados observa-se que os valores máximos de NDVI (valores saturados) podem ser utilizados como um comparador de desempenho de culturas semeadas em diferentes datas.

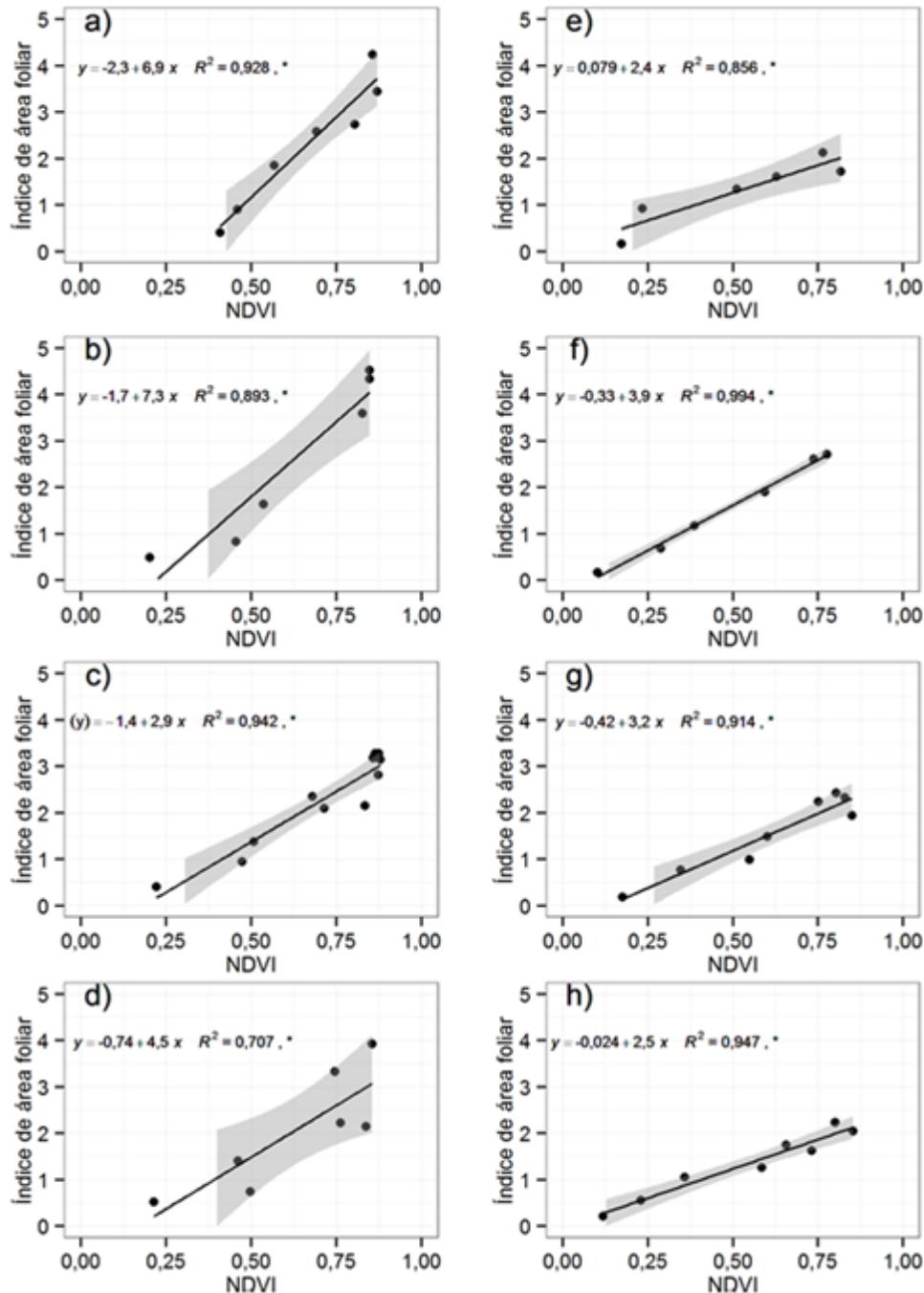


**Figura 16.** Comportamento do NDVI em função dos dias após a emergência da cultura para a semeadura realizada em 03/07/2013 (segunda data de semeadura), em Santo Antônio de Goiás-GO

#### 4.1 ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

De acordo com Oliveira et al. (2013), a área foliar da cultura do feijoeiro é um dos componentes de produção que mais se associa à produtividade final de grãos, podendo ser usada na seleção indireta de plantas em programas de melhoramento de plantas. Na Figura 17 são apresentadas as regressões entre o índice de área foliar e o NDVI dos quatro genótipos na primeira e segunda data de semeadura (ambas plantio de inverno). Para essas datas a qualidade dos ajustes foi similar (Tabela 3). Entre os genótipos também se obteve valores próximos. Na primeira data de semeadura o melhor ajuste foi com o genótipo BRS Pérola e o de menor qualidade com o genótipo BRS Pontal. Esse também foi o ajuste de

menor qualidade entre as duas datas (considerando todos os índices estatísticos de avaliação dos modelos).



**Figura 17.** Regressões entre o índice de área foliar e o NDVI na primeira e segunda data de semeadura, respectivamente, para os genótipos BRS Agreste (**a** e **e**), Bat 477 (**b** e **f**), BRS Pérola (**c** e **g**) e BRS Pontal (**d** e **h**), em Santo Antônio de Goiás-GO

O RMSE do genótipo BRS Pontal na data I foi de 0,64 e do BRS Pérola de 0,31. Já na segunda data o melhor ajuste foi para o genótipo Bat 477, esse também foi o

melhor ajuste observado entre as duas datas para a variável IAF, seu RMSE foi de apenas 0,07. O ajuste de menor qualidade na segunda data foi observado para o genótipo BRS Agreste, o qual apresentou todos os índices estatísticos com qualidade inferior aos demais modelos nessa data.

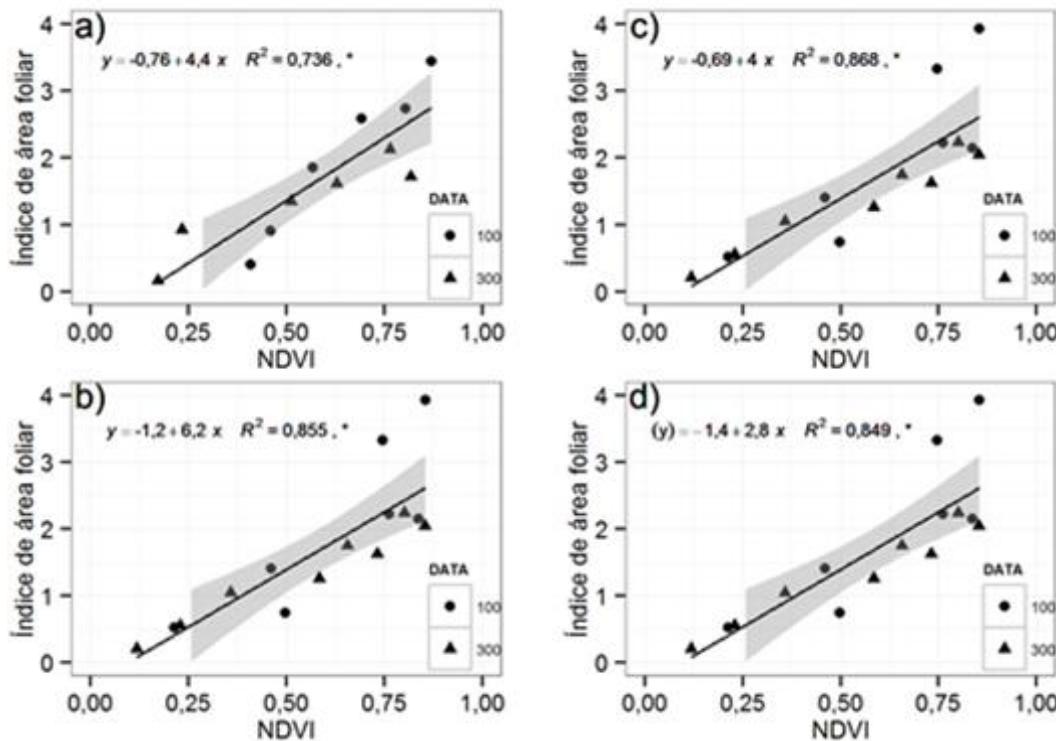
**Tabela 3.** Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa do índice de área foliar para os diferentes genótipos em cada data de semeadura (maio – I e junho – II), em Santo Antônio de Goiás-GO

| DT | GENÓTIPO    | $\bar{O}$ | $\bar{P}$ | SD<br>O | SD<br>P | RMSE | MAE  | EF   | d    | R <sup>2</sup> |
|----|-------------|-----------|-----------|---------|---------|------|------|------|------|----------------|
| I  | BRS Agreste | 2,31      | 2,31      | 1,36    | 1,31    | 0,34 | 0,27 | 0,93 | 0,98 | 0,928          |
| I  | Bat 477     | 3,22      | 3,22      | 1,94    | 1,83    | 0,59 | 0,53 | 0,89 | 0,97 | 0,893          |
| I  | BRS Pérola  | 2,28      | 2,27      | 1,00    | 1,04    | 0,31 | 0,23 | 0,89 | 0,97 | 0,942          |
| I  | BRS Pontal  | 2,04      | 2,04      | 1,27    | 1,07    | 0,64 | 0,57 | 0,71 | 0,91 | 0,707          |
| II | BRS Agreste | 1,32      | 1,32      | 0,69    | 0,64    | 0,24 | 0,21 | 0,86 | 0,96 | 0,856          |
| II | Bat 477     | 1,54      | 1,54      | 1,04    | 1,04    | 0,07 | 0,06 | 0,99 | 1,00 | 0,994          |
| II | BRS Pérola  | 1,55      | 1,55      | 0,83    | 0,79    | 0,23 | 0,18 | 0,91 | 0,98 | 0,914          |
| II | BRS Pontal  | 1,34      | 1,34      | 0,71    | 0,69    | 0,15 | 0,13 | 0,95 | 0,99 | 0,947          |

DT = data de semeadura;  $\bar{O}$  = média dos valores observados;  $\bar{P}$  = média dos valores preditos; SD O = desvio-padrão dos valores observados; SD P = desvio-padrão dos valores preditos; RMSE = raiz do erro quadrático médio; MAE = erro médio absoluto; EF = coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; d = índice de concordância de Willmott; e R<sup>2</sup> = coeficiente de determinação.

Considerando conjuntamente os dados das duas datas de semeadura (Figura 18 e Tabela 4), observa-se que o maior valor de RMSE foi obtido com o genótipo Bat 477 (0,65) e de acordo com o índice de Willmott, o EF e o R<sup>2</sup>, esse foi um dos melhores ajustes. O RMSE e o MAE foram capazes de discriminar a menor qualidade do ajuste para esse genótipo, já os outros índices estatísticos não foram capazes devido à menor diferença entre o desvio-padrão dos valores observados e preditos. O genótipo BRS Pérola apresentou os melhores índices estatísticos de qualidade do ajuste.

Considerando conjuntamente todos os dados (quatro genótipos e duas datas de semeadura, Figura 19 e Tabela 5), houve aumento do RMSE para 0,63 e decréscimo no valor de d (0,92). O desvio entre a média dos valores observados e preditos foi de 0,06. Como se trata de diferentes genótipos, isso explica o decréscimo na eficiência do modelo geral. Monteiro et al. (2013) obtiveram melhores ajustes do IAF utilizando modelos potenciais (não avaliado nesse estudo). De acordo com esses autores, devido à saturação do NDVI os modelos potenciais se ajustam melhor. Entretanto, os mesmos autores também obtiveram bons ajustes com o modelo linear.



**Figura 18.** Regressões entre o índice de área foliar e o NDVI para a média das duas datas de semeadura para os genótipos BRS Agreste (a), Bat 477 (b), BRS Pérola (c) e BRS Pontal (d), em Santo Antônio de Goiás-GO

**Tabela 4.** Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa do índice de área foliar para os diferentes genótipos nas duas datas de semeadura, em Santo Antônio de Goiás-GO

| GENÓTIPO    | $\bar{O}$ | $\bar{P}$ | SD O | SD P | RMSE | MAE  | EF   | d    | $R^2$ |
|-------------|-----------|-----------|------|------|------|------|------|------|-------|
| BRS Agreste | 1,85      | 1,85      | 1,18 | 1,01 | 0,58 | 0,46 | 0,74 | 0,92 | 0,736 |
| Bat 477     | 2,50      | 2,50      | 1,78 | 1,65 | 0,65 | 0,57 | 0,86 | 0,96 | 0,855 |
| BRS Pérola  | 1,97      | 1,97      | 0,98 | 0,91 | 0,35 | 0,28 | 0,87 | 0,96 | 0,868 |
| BRS Pontal  | 1,67      | 1,63      | 1,04 | 0,92 | 0,53 | 0,39 | 0,71 | 0,91 | 0,849 |

$\bar{O}$  = média dos valores observados;  $\bar{P}$  = média dos valores preditos; SD O = desvio-padrão dos valores observados; SD P = desvio-padrão dos valores preditos; RMSE = raiz do erro quadrático médio; MAE = erro médio absoluto; EF = coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; d = índice de concordância de Willmott; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

De acordo com os resultados obtidos neste estudo, a estimativa do IAF por meio do NDVI pode ser realizada por um modelo de regressão linear de forma satisfatória (de acordo com o modelo da equação 7), independente da data de semeadura e genótipo utilizado.

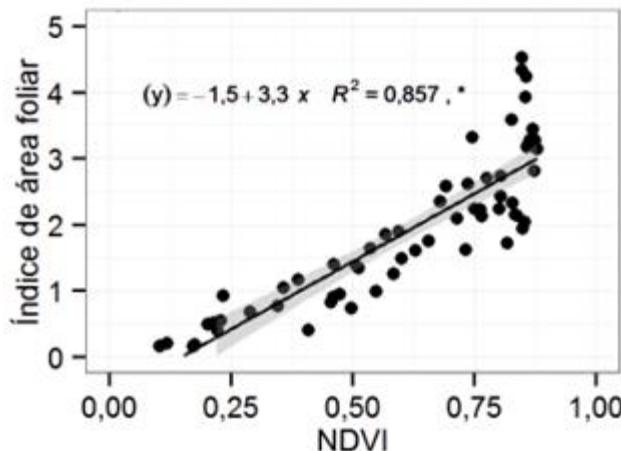
$$(y^\lambda - 1)/\lambda = -1,5 + 3,3x \quad (7)$$

Onde:

$y = \text{IAF}$ ;

$\lambda$  = parâmetro estimado para transformação (0,2); e

$x$  = valor de NDVI.



**Figura 19.** Regressões entre o índice de área foliar e o NDVI para a média das duas datas de semeadura e dos quatro genótipos de feijão, em Santo Antônio de Goiás-GO

**Tabela 5.** Valores dos índices estatísticos da avaliação do modelo de estimativa do índice de área foliar da cultura para todos os genótipos e nas duas datas de semeadura, em Santo Antônio de Goiás-GO

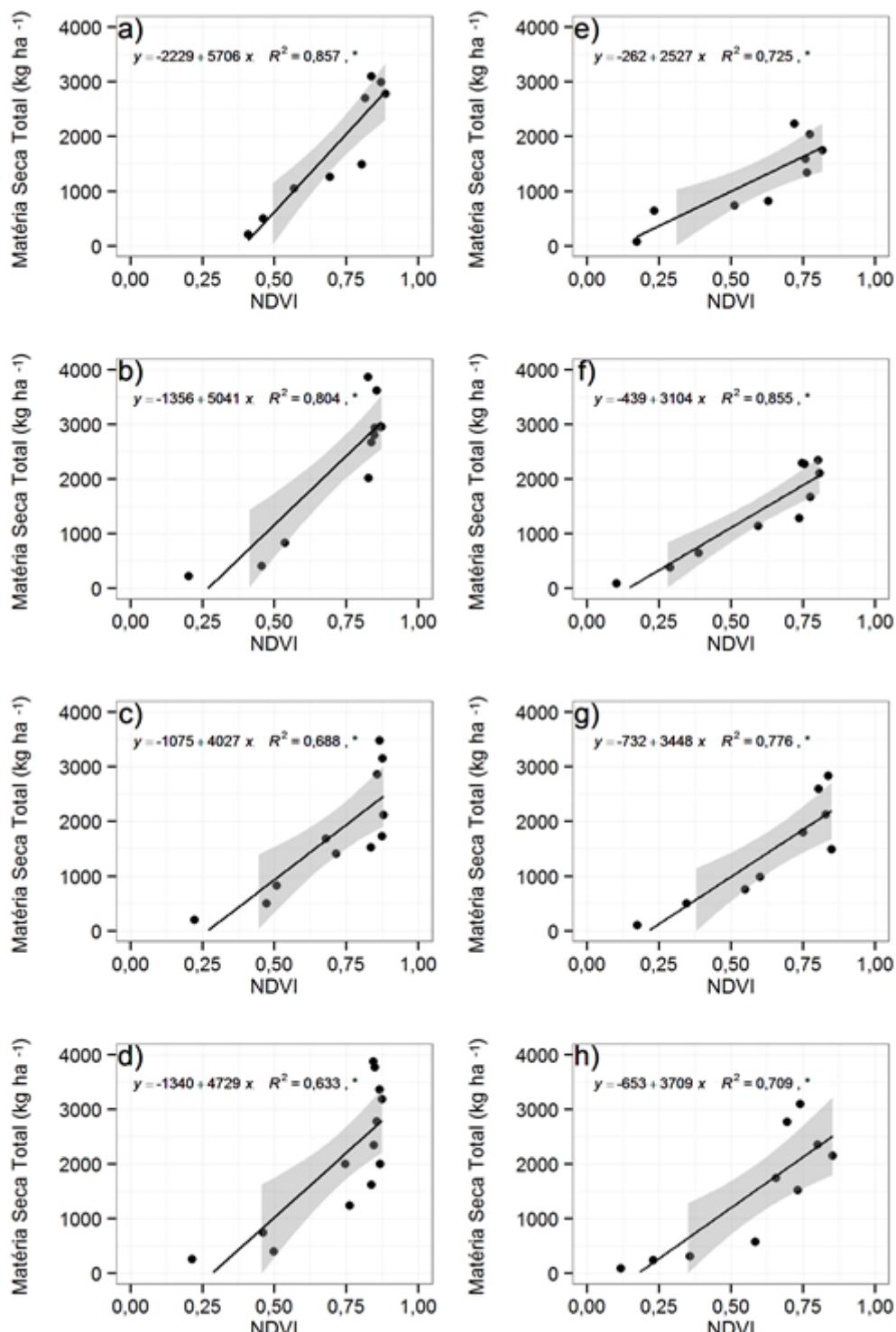
| VARIÁVEL | $\bar{O}$ | $\bar{P}$ | SD<br>$O$ | SD<br>$P$ | RMSE | MAE  | EF   | d    | $R^2$ |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|------|------|------|-------|
| IAF      | 1,99      | 1,94      | 1,26      | 1,08      | 0,63 | 0,44 | 0,75 | 0,92 | 0,857 |

$\bar{O}$  = média dos valores observados;  $\bar{P}$  = média dos valores preditos; SD  $O$  = desvio-padrão dos valores observados; SD  $P$  = desvio-padrão dos valores preditos; RMSE = raiz do erro quadrático médio; MAE = erro médio absoluto; EF = coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; d = índice de concordância de Willmott; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

#### 4.2 MATÉRIA SECA TOTAL

Para todos os índices estatísticos de qualidade dos ajustes, os melhores modelos foram encontrados com os genótipos BRS Agreste e Bat 477, na primeira e segunda data de semeadura, respectivamente (Figura 20 e Tabela 6). Já, o genótipo BRS Pontal apresentou o pior ajuste para as duas datas de semeadura. O RMSE do genótipo BRS Pontal na data I foi de 719,00 kg ha<sup>-1</sup> e o MAE de 613,76 kg ha<sup>-1</sup>, na data II seu RMSE foi de 571,42 kg ha<sup>-1</sup> e seu MAE de 447,84 kg ha<sup>-1</sup>. O RMSE do genótipo BRS Agreste na data I foi de 399,30 kg ha<sup>-1</sup> e seu MAE foi de 300,48 kg ha<sup>-1</sup>. Para o genótipo Bat 477 na data II seu RMSE foi de 305,27 kg ha<sup>-1</sup> e seu MAE foi de 263,68 kg ha<sup>-1</sup>. O

índice de concordância d foi acima de 0,90 para os genótipos, exceto para o BRS Pontal na data de semeadura I. Esse cultivar também apresentou o menor valor de EF (0,63) para a data I.



**Figura 20.** Regressões entre a matéria seca total de plantas e o NDVI na primeira e segunda data de semeadura, respectivamente, para os genótipos BRS Agreste

(**a** e **e**), Bat 477 (**b** e **f**), BRS Pérola (**c** e **g**) e BRS Pontal (**d** e **h**), em Santo Antônio de Goiás-GO

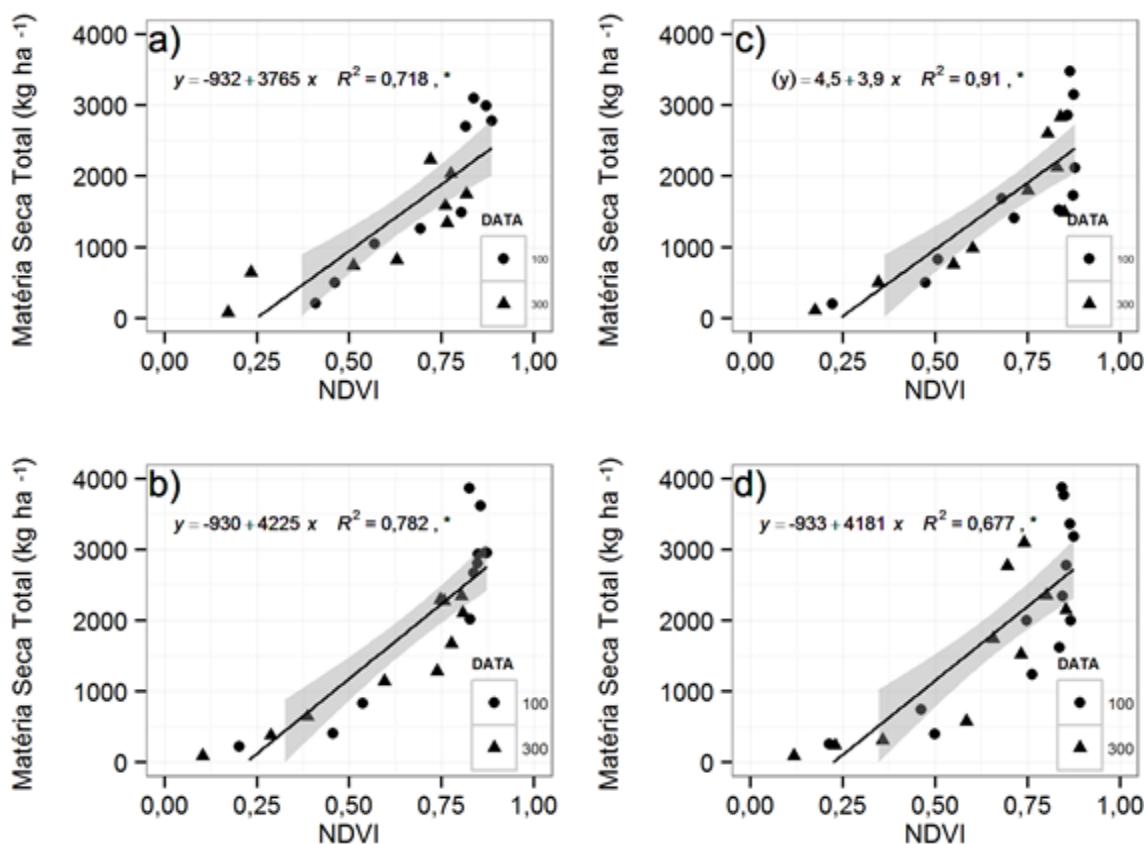
**Tabela 6.** Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa da matéria seca total de plantas para os diferentes genótipos em cada data de semeadura (maio – I e junho – II), em Santo Antônio de Goiás-GO

| DT | GENÓTIPO    | $\bar{O}$           | $\bar{P}$ | SD<br>O | SD<br>P | RMSE   | MAE    | EF   | d    | $R^2$ |
|----|-------------|---------------------|-----------|---------|---------|--------|--------|------|------|-------|
|    |             | $\text{kg ha}^{-1}$ |           |         |         |        |        |      |      |       |
| I  | BRS Agreste | 1789,82             | 1789,82   | 1121,79 | 1038,77 | 399,30 | 300,48 | 0,86 | 0,96 | 0,857 |
| I  | Bat 477     | 2297,48             | 2297,48   | 1262,36 | 1131,95 | 532,79 | 417,39 | 0,80 | 0,94 | 0,804 |
| I  | BRS Pérola  | 1773,19             | 1773,19   | 1063,34 | 882,31  | 565,86 | 486,11 | 0,69 | 0,90 | 0,688 |
| I  | BRS Pontal  | 2120,36             | 2120,36   | 1236,13 | 983,87  | 719,00 | 613,76 | 0,63 | 0,88 | 0,633 |
| II | BRS Agreste | 1248,48             | 1248,48   | 719,57  | 612,57  | 355,95 | 297,51 | 0,72 | 0,91 | 0,725 |
| II | Bat 477     | 1423,04             | 1423,04   | 844,49  | 780,78  | 305,27 | 263,78 | 0,85 | 0,96 | 0,855 |
| II | BRS Pérola  | 1468,09             | 1468,09   | 949,34  | 836,14  | 423,86 | 337,04 | 0,78 | 0,93 | 0,776 |
| II | BRS Pontal  | 1485,70             | 1485,70   | 1115,97 | 939,46  | 571,42 | 447,84 | 0,71 | 0,91 | 0,709 |

DT = data de semeadura;  $\bar{O}$  = média dos valores observados;  $\bar{P}$  = média dos valores preditos; SD O = desvio-padrão dos valores observados; SD P = desvio-padrão dos valores preditos; RMSE = raiz do erro quadrático médio; MAE = erro médio absoluto; EF = coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; d = índice de concordância de Willmott; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

A análise conjunta dos genótipos considerando as duas datas de semeadura não prejudicou a qualidade dos ajustes (Figura 21 e Tabela 7). Quando comparados com as regressões individuais dos genótipos para cada data de semeadura, os valores de RMSE e MAE ficaram em valores médios entre a data de semeadura I e II para todos os genótipos. Já o índice de concordância d e o  $R^2$  pouco se alteraram. O  $R^2$  apresentou valores medianos, porém, os valores de d se mantiveram altos e pouco diferiram entre si. Isso demonstra que erros de avaliação podem ocorrer quando se usa apenas um desses dois índices.

O genótipo Bat 477 apresentou valor de d mais próximo a 1 (0,94) e o genótipo BRS Pérola os menores valores de RMSE e MAE, portanto, melhor qualidade do ajuste. O EF não foi capaz de discriminar o melhor ajuste para o genótipo BRS Pérola. Segundo Legates & McCabe Jr (1999), se o quadrado da diferença entre os dados observados e simulados for grande, assim como uma maior variabilidade nos valores observados, o EF será menor e tenderá a zero. Willmott et al. (2011) sugerem que os índices que consideram as medidas dos desvios, baseada em valores absolutos, como o MAE, devem ser preferidos. De acordo com Chai & Draxler (2014), tanto o uso do MAE quanto do RMSE são indicados, e na maioria das situações o RMSE se mostra mais adequado que o MAE.



**Figura 21.** Regressões entre a matéria seca total de plantas e o NDVI para a média das duas datas de semeadura para os genótipos BRS Agreste (a), Bat 477 (b), BRS Pérola (c) e BRS Pontal (d), em Santo Antônio de Goiás-GO

**Tabela 7.** Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa da matéria seca total de plantas para os diferentes genótipos nas duas datas de semeadura, em Santo Antônio de Goiás-GO

| GENÓTIPO    | $\bar{O}$ | $\bar{P}$ | SD<br>O | SD<br>P | RMSE   | MAE    | EF   | d    | $R^2$ |
|-------------|-----------|-----------|---------|---------|--------|--------|------|------|-------|
|             | kg ha⁻¹   |           |         |         |        |        |      |      |       |
| BRS Agreste | 1519,15   | 1519,15   | 955,73  | 809,68  | 493,49 | 451,24 | 0,72 | 0,91 | 0,718 |
| Bat 477     | 1881,08   | 1881,08   | 1148,03 | 1015,46 | 522,63 | 400,51 | 0,78 | 0,94 | 0,782 |
| BRS Pérola  | 1635,89   | 1609,45   | 999,41  | 925,04  | 487,91 | 367,67 | 0,75 | 0,93 | 0,910 |
| BRS Pontal  | 1844,42   | 1844,42   | 1202,68 | 989,72  | 668,27 | 564,92 | 0,68 | 0,90 | 0,677 |

$\bar{O}$  = média dos valores observados;  $\bar{P}$  = média dos valores preditos; SD O = desvio-padrão dos valores observados; SD P = desvio-padrão dos valores preditos; RMSE = raiz do erro quadrático médio; MAE = erro médio absoluto; EF = coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; d = índice de concordância de Willmott; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

Analizando conjuntamente todos os dados de MST, o resultado a qualidade do ajuste foi satisfatória (Figura 22 e Tabela 8). Os valores de EF, d e  $R^2$  mantiveram-se altos

(0,77; 0,93 e 0,882, respectivamente). Os valores preditos foram subestimados em 55,39 kg ha<sup>-1</sup>, porém, a diferença entre a média dos valores observados e dos preditos é menor que a raiz do erro médio (519,00 kg ha<sup>-1</sup>). Já o MAE apresentou substancial redução (280,48 kg ha<sup>-1</sup>). Segundo Oliveira et al. (2013), a massa da parte aérea é uma importante variável que afeta a produtividade de grãos. Para esses autores, essa variável atua de maneira inversa à produtividade da cultura do feijão, quanto mais massa aérea a cultura acumula, menor pode ser a disponibilidade de fotoassimilados para os grãos, pois a estrutura vegetativa se torna um dreno significativo. De acordo com os resultados obtidos nesse estudo, a estimativa da MST por meio do NDVI pode ser realizada por meio de um modelo de regressão de forma satisfatória (equação 8), independente da data de semeadura e genótipo utilizado.

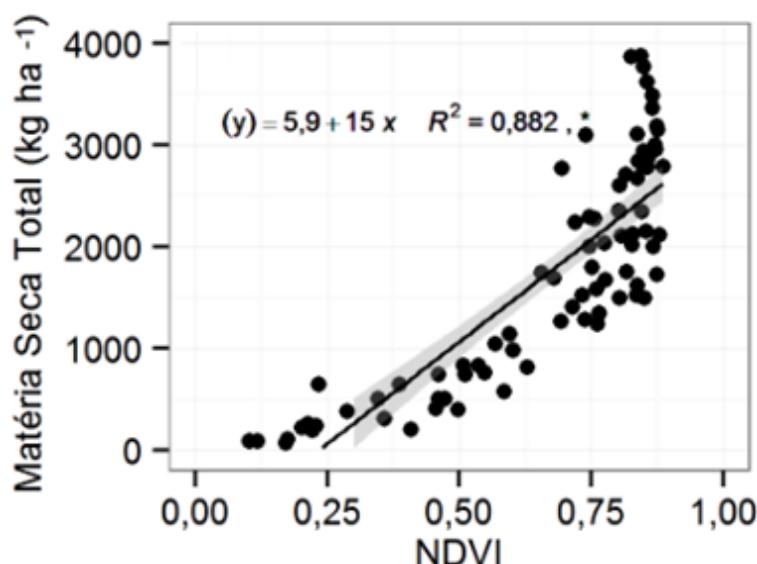
$$(y\lambda - 1)/\lambda = 5,9 + 1,5x \quad (8)$$

Onde:

y = MST (kg ha<sup>-1</sup>);

$\lambda$  = parâmetro estimado para transformação (0,2); e

x = NDVI.



**Figura 22.** Regressão entre a matéria seca total de plantas e o NDVI para a média das duas datas de semeadura e dos quatro genótipos de feijão, em Santo Antônio de Goiás-GO

**Tabela 8.** Valores dos índices estatísticos da avaliação do modelo de estimativa da matéria seca total de plantas para todos os genótipos e nas duas datas de semeadura, em Santo Antônio de Goiás-GO

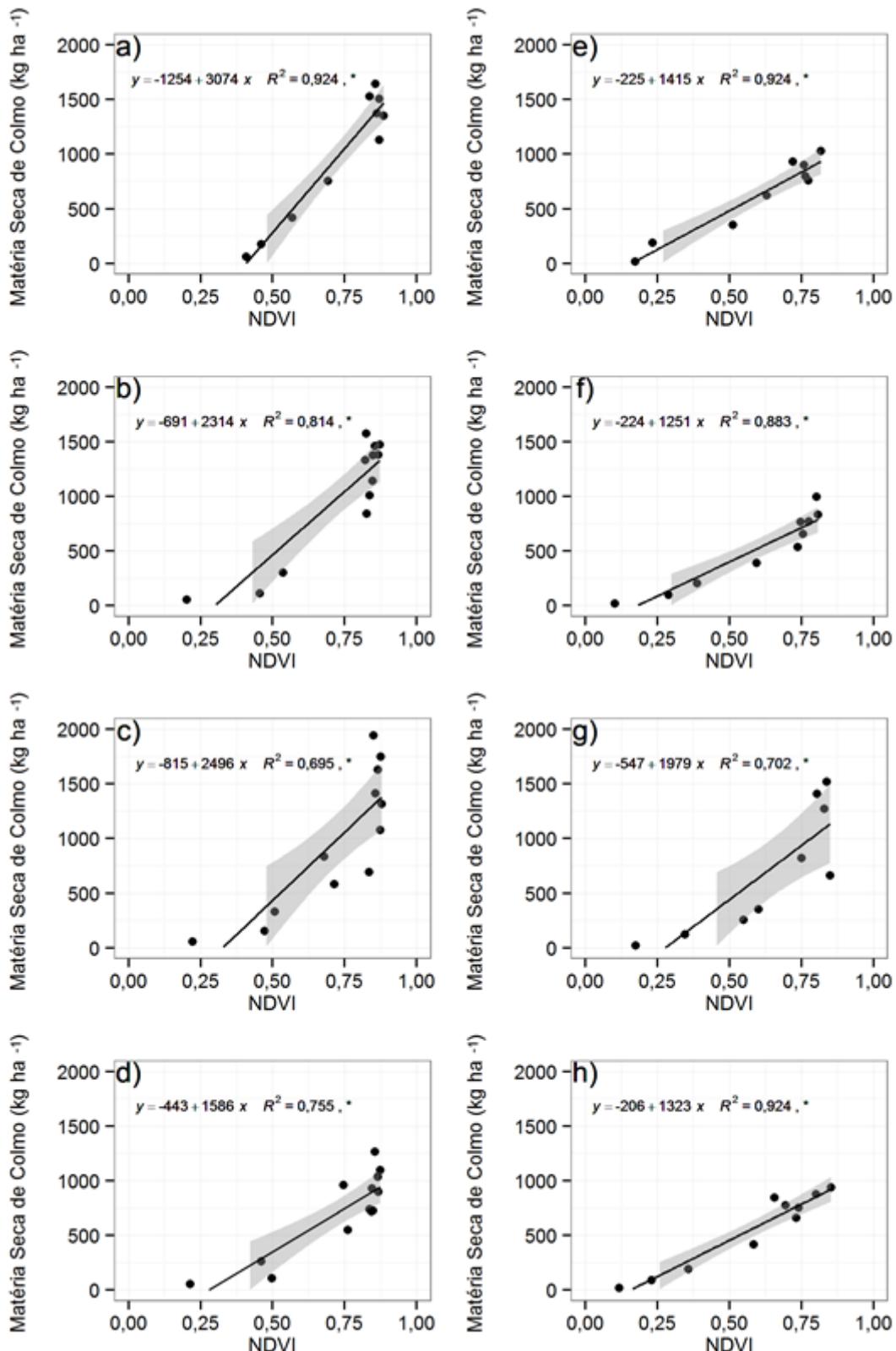
| VARIÁVEL | $\bar{O}$           | $\bar{P}$ | SD<br>O | SD<br>P | RMSE   | MAE    | EF   | d    | $R^2$ |
|----------|---------------------|-----------|---------|---------|--------|--------|------|------|-------|
|          | kg ha <sup>-1</sup> |           |         |         |        |        |      |      |       |
| MST      | 1731,55             | 1676,16   | 1079,81 | 912,10  | 519,00 | 280,48 | 0,77 | 0,93 | 0,882 |

$\bar{O}$  = média dos valores observados;  $\bar{P}$  = média dos valores preditos; SD O = desvio-padrão dos valores observados; SD P = desvio-padrão dos valores preditos; RMSE = raiz do erro quadrático médio; MAE = erro médio absoluto; EF = coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; d = índice de concordância de Willmott; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

#### 4.3 MATÉRIA SECA DE COLMOS

Para a variável matéria seca de colmos a qualidade dos ajustes dos genótipos semeados na data II foi superior (Figura 23 e Tabela 9). O genótipo BRS Pérola apresentou a menor qualidade de todos os índices estatísticos dos modelos nas duas datas de semeadura. Considerando o RMSE e o MAE, na data I e II o melhor ajuste foi obtido com o genótipo BRS Pontal.

Para todos os genótipos o índice d foi igual ou superior a 0,90, apesar do  $R^2$  ter sido de 0,695 e 0,702 para o genótipo BRS Pérola na data I e II, respectivamente. Como a variabilidade dos valores observados e preditos foram altas, os valores de d também foram altos, corroborando os resultados encontrados por Krause et al. (2005). Segundo esses autores, mesmo para ajustes ruins o índice d pode apresentar valores altos. Outra ambiguidade do índice de concordância de Willmott ocorre quando  $P_i$  é igual a  $\bar{O}$ , resultando em  $d = 0$  (Willmott et al., 2011). Como os valores do desvio-padrão para esse genótipo (BRS Pérola), em cada data de semeadura, foram os maiores e o  $R^2$  mede o grau de dispersão dos valores observados em relação à reta de ajuste (Gujarati & Porter, 2010), a maior amplitude entre valores observados e preditos resultou num baixo coeficiente de determinação, o que pode ser confirmado com os maiores erros para esse genótipo (Tabela 9).



**Figura 23.** Regressões entre a matéria seca de colmo e o NDVI na primeira e segunda data de semeadura, respectivamente, para os genótipos BRS Agreste (a e e), Bat 477 (b e f), BRS Pérola (c e g) e BRS Pontal (d e h), em Santo Antônio de Goiás-GO

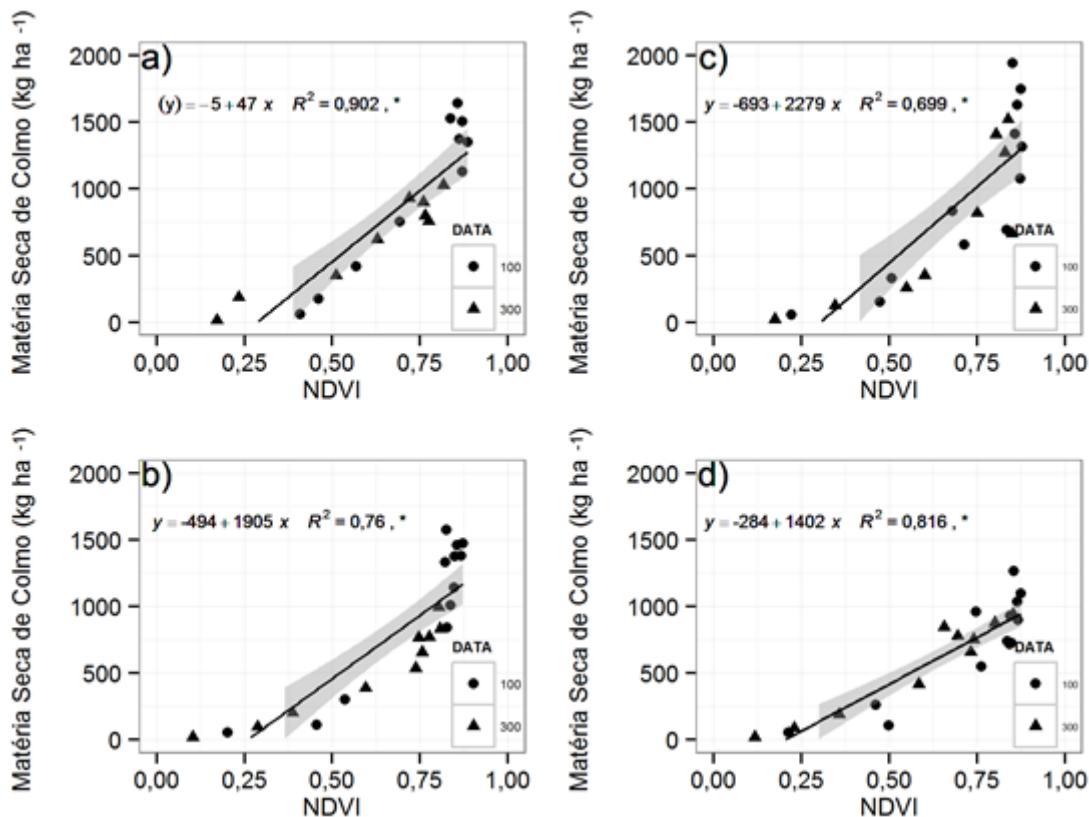
**Tabela 9.** Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa da matéria seca de colmo para os diferentes genótipos em cada data de semeadura (maio – I e junho – II), em Santo Antônio de Goiás-GO

| DT | GENÓTIPO    | $\bar{O}$     | $\bar{P}$ | SD<br>O | SD<br>P | RMSE   | MAE    | EF   | d    | $R^2$ |
|----|-------------|---------------|-----------|---------|---------|--------|--------|------|------|-------|
|    |             | $kg\ ha^{-1}$ |           |         |         |        |        |      |      |       |
| I  | BRS Agreste | 993,53        | 993,53    | 595,12  | 572,03  | 155,75 | 125,18 | 0,92 | 0,98 | 0,924 |
| I  | Bat 477     | 1004,20       | 1004,20   | 553,65  | 499,57  | 228,51 | 207,12 | 0,81 | 0,95 | 0,814 |
| I  | BRS Pérola  | 980,70        | 980,70    | 637,96  | 531,66  | 337,60 | 283,28 | 0,69 | 0,90 | 0,695 |
| I  | BRS Pontal  | 717,82        | 717,82    | 379,69  | 330,02  | 180,39 | 156,69 | 0,76 | 0,93 | 0,755 |
| II | BRS Agreste | 621,57        | 621,57    | 356,86  | 343,08  | 92,58  | 81,17  | 0,92 | 0,98 | 0,924 |
| II | Bat 477     | 526,33        | 526,33    | 334,86  | 314,75  | 108,44 | 91,28  | 0,88 | 0,97 | 0,883 |
| II | BRS Pérola  | 715,96        | 715,96    | 572,62  | 479,92  | 294,50 | 261,08 | 0,70 | 0,91 | 0,702 |
| II | BRS Pontal  | 556,52        | 556,52    | 348,49  | 335,00  | 91,09  | 71,76  | 0,92 | 0,98 | 0,924 |

DT = data de semeadura;  $\bar{O}$  = média dos valores observados;  $\bar{P}$  = média dos valores preditos; SD O = desvio-padrão dos valores observados; SD P = desvio-padrão dos valores preditos; RMSE = raiz do erro quadrático médio; MAE = erro médio absoluto; EF = coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; d = índice de concordância de Willmott; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

A análise conjunta dos dados das duas datas de semeadura (Figura 24 e Tabela 10) também resultou em modelos satisfatórios para se estimar a matéria seca de colmos a partir do NDVI. Os genótipos BRS Agreste e BRS Pontal apresentaram os melhores ajustes para todos os índices estatísticos analisados. O genótipo BRS Pérola apresentou a pior qualidade do ajuste, o que foi evidenciado na análise individual das regressões nas datas separadas. A maior amplitude do desvio-padrão dos genótipos Bat 477 e BRS Pérola novamente ocasionou menor  $R^2$  dos seus ajustes, enquanto que o d se manteve com valor alto para todos os genótipos, entretanto, os erros dos modelos desses genótipos foram mais altos que os demais (RMSE e MAE).

Os valores do MAE do genótipo BRS Pontal foram praticamente idênticos aos do genótipo BRS Agreste (123,71 e 123,85  $kg\ ha^{-1}$ , respectivamente). Entretanto, o RMSE do genótipo BRS Agreste foi de 163,50  $kg\ ha^{-1}$ , enquanto que para o genótipo BRS Pontal o RMSE foi de 153,96  $kg\ ha^{-1}$  (configurando esse como o genótipo de melhor ajuste). O EF e  $R^2$  conseguiram discriminar essa diferença, enquanto que o d pouco diferenciou os genótipos.



**Figura 24.** Regressões entre a matéria seca de colmos e o NDVI para a média das duas datas de semeadura para os genótipos BRS Agreste (a), Bat 477 (b), BRS Pérola (c) e BRS Pontal (d), em Santo Antônio de Goiás-GO

**Tabela 10.** Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa da matéria seca de colmo para os diferentes genótipos nas duas datas de semeadura, em Santo Antônio de Goiás-GO

| GENÓTIPO    | $\bar{O}$           | $\bar{P}$ | SD<br>O | SD<br>P | RMSE   | MAE    | EF   | d    | $R^2$ |
|-------------|---------------------|-----------|---------|---------|--------|--------|------|------|-------|
|             | $\text{kg ha}^{-1}$ |           |         |         |        |        |      |      |       |
| BRS Agreste | 817,34              | 806,34    | 519,70  | 457,27  | 163,50 | 123,85 | 0,90 | 0,97 | 0,902 |
| Bat 477     | 786,99              | 786,99    | 517,62  | 451,36  | 247,57 | 218,57 | 0,76 | 0,93 | 0,760 |
| BRS Pérola  | 867,24              | 867,24    | 610,76  | 510,58  | 327,10 | 274,81 | 0,70 | 0,91 | 0,699 |
| BRS Pontal  | 647,69              | 647,69    | 367,43  | 332,00  | 153,96 | 123,71 | 0,82 | 0,95 | 0,816 |

$\bar{O}$  = média dos valores observados;  $\bar{P}$  = média dos valores preditos; SD O = desvio-padrão dos valores observados; SD P = desvio-padrão dos valores preditos; RMSE = raiz do erro quadrático médio; MAE = erro médio absoluto; EF = coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; d = índice de concordância de Willmott; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

A matéria seca de colmo estimada a partir do NDVI considerando conjuntamente todos os dados (duas datas de semeadura e quatro genótipos de feijoeiro) apresentou boa qualidade do ajuste (Figura 25 e Tabela 11). A raiz do erro quadrático médio foi de 226,66  $\text{kg ha}^{-1}$  e o erro médio absoluto foi de 165,25  $\text{kg ha}^{-1}$ . Leal et al.

(2013), estudando o volume de madeira de eucalipto estimado a partir de diversos índices de vegetação (EVI 1 e 2, SAVI, NDVI e MSAVI 2), encontraram baixa qualidade de ajuste para todos os índices, entretanto, os melhores resultados foram encontrados com o índice NDVI. Assim, independente do genótipo e data de semeadura, pode-se estimar a matéria seca de colmos com o uso do NDVI, conforme equação 9.

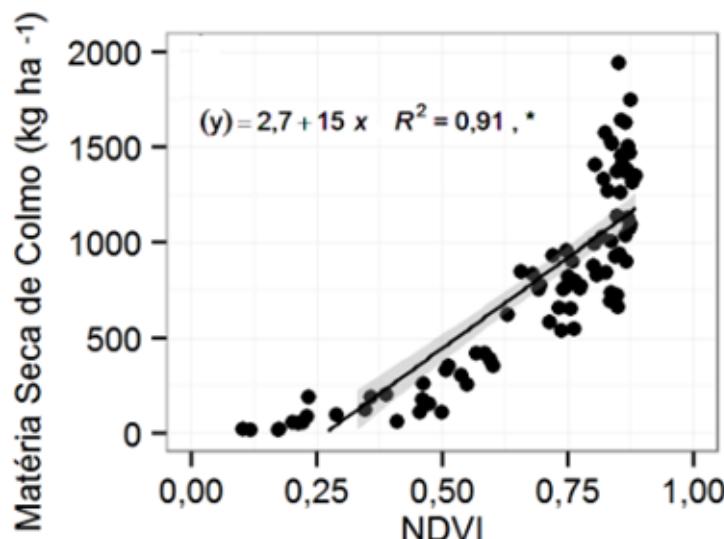
$$(y\lambda - 1)/\lambda = 2,7 + 1,5x \quad (9)$$

Onde:

y = MSC ( $\text{kg ha}^{-1}$ );

$\lambda$  = parâmetro estimado para transformação (0,2); e

x = NDVI.



**Figura 25.** Regressão entre a matéria seca de colmo e o NDVI para a média de duas datas de semeadura e quatro genótipos de feijão, em Santo Antônio de Goiás-GO

**Tabela 11.** Valores dos índices estatísticos da avaliação do modelo de estimativa da matéria seca de colmo para todos os genótipos e nas duas datas de semeadura, em Santo Antônio de Goiás-GO

| VARIÁVEL            | $\bar{O}$ | $\bar{P}$ | SD<br>O | SD<br>P | RMSE   | MAE    | EF   | d    | $R^2$ |
|---------------------|-----------|-----------|---------|---------|--------|--------|------|------|-------|
| $\text{kg ha}^{-1}$ |           |           |         |         |        |        |      |      |       |
| MSC                 | 775,91    | 753,65    | 506,01  | 440,05  | 226,66 | 165,25 | 0,80 | 0,94 | 0,910 |

$\bar{O}$  = média dos valores observados;  $\bar{P}$  = média dos valores preditos; SD O = desvio-padrão dos valores observados; SD P = desvio-padrão dos valores preditos; RMSE = raiz do erro quadrático médio; MAE = erro médio absoluto; EF = coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; d = índice de concordância de Willmott; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

#### 4.4 MATÉRIA SECA DE FOLHA

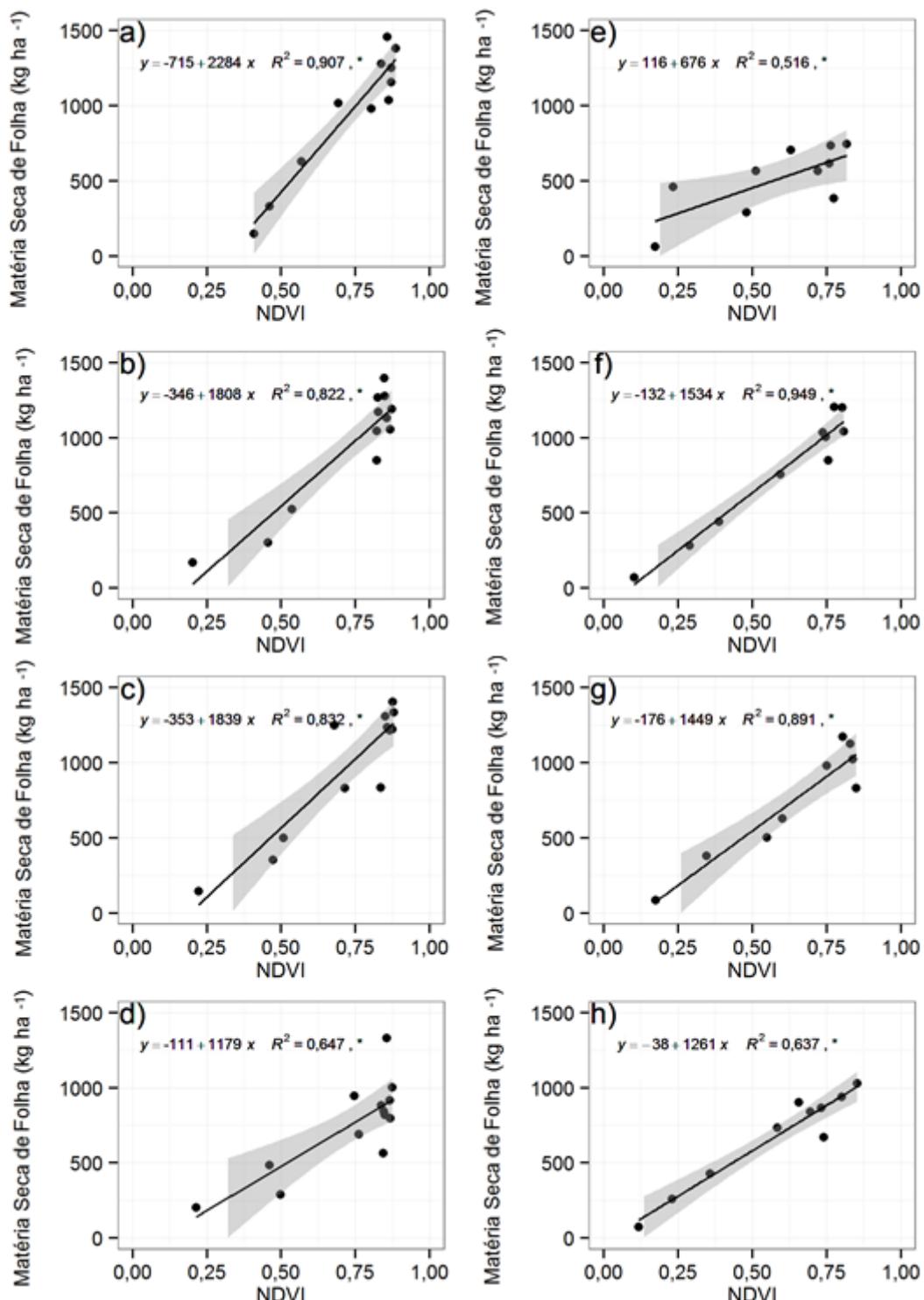
Dentro das datas de semeadura, os melhores ajustes para estimar a matéria seca de folha a partir do NDVI foram obtidos com os genótipos BRS Agreste na data I de semeadura e com o genótipo BRS Pontal na data II (Figura 26 e Tabela 12). O RMSE e MAE do BRS Agreste na data I foi de 124,32 e 103,70 kg ha<sup>-1</sup>, e do BRS Pontal na data II foi de 82,42 kg ha<sup>-1</sup> e 49,76 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Já os ajustes de menor qualidade também foram obtidos com esses mesmos genótipos, BRS Agreste nas datas II e BRS Pontal na data I de semeadura (considerando todos os índices estatísticos de qualidade dos modelos). Entretanto, destaca-se que a diferença entre os erros (RMSE e MAE) dos melhores e piores ajustes foi baixa, o que não impõe a necessidade de estimar a MSF para esses genótipos a partir do NDVI somente nas datas que foram melhores.

Segundo Wilmott (1981) o coeficiente de determinação superestima o erro quando há menor magnitude do desvio-padrão dos valores observados ou preditos. Para o genótipo BRS Pontal na data II, apesar de apresentar um dos melhores ajustes, o coeficiente de determinação teve um valor baixo. Segundo Krause et al. (2005), a maior desvantagem do R<sup>2</sup> é o fato dele apenas quantificar a dispersão dos dados observados em relação ao modelo. Assim a presença de alguns dados mais dispersos (Figura 26h) foi o suficiente para o R<sup>2</sup> indicar um modelo de qualidade inferior.

De acordo com Legates & McCabe Jr (1999), o coeficiente EF é um aperfeiçoamento do R<sup>2</sup>. Observa-se que o coeficiente de Nash-Sutcliffe (EF) foi muito dependente dos valores do desvio-padrão dos dados observados e preditos (SD O e SD P). Quando a diferença entre o desvio-padrão dos dados observados e preditos foi pequena (por exemplo, para o genótipo BRS Pontal na data II) o coeficiente EF foi alto. Quando houve maior diferença entre o desvio-padrão dos dados observados e preditos o coeficiente EF foi baixo (BRS Pontal na data I e BRS Agreste na data II). Para esses genótipos o coeficiente de determinação foi similar, mas o EF variou bastante.

Quando se reuniu os genótipos das duas datas de semeadura, a qualidade dos ajustes se mostrou similar aos ajustes individuais (Figura 27 e Tabela 13). O desvio-padrão dos valores observados e preditos para a matéria seca de folha foi reduzido, o que provocou a discrepância entre os índices d e R<sup>2</sup> para cada genótipo. O melhor ajuste foi encontrado para o genótipo Bat 477, para o qual o RMSE e MAE foram os menores,

142,32 e 110,95 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. O ajuste de menor qualidade foi obtido com o genótipo BRS Agreste, para o qual o RMSE e MAE foram de 236,45 e 190,95 kg ha<sup>-1</sup>.

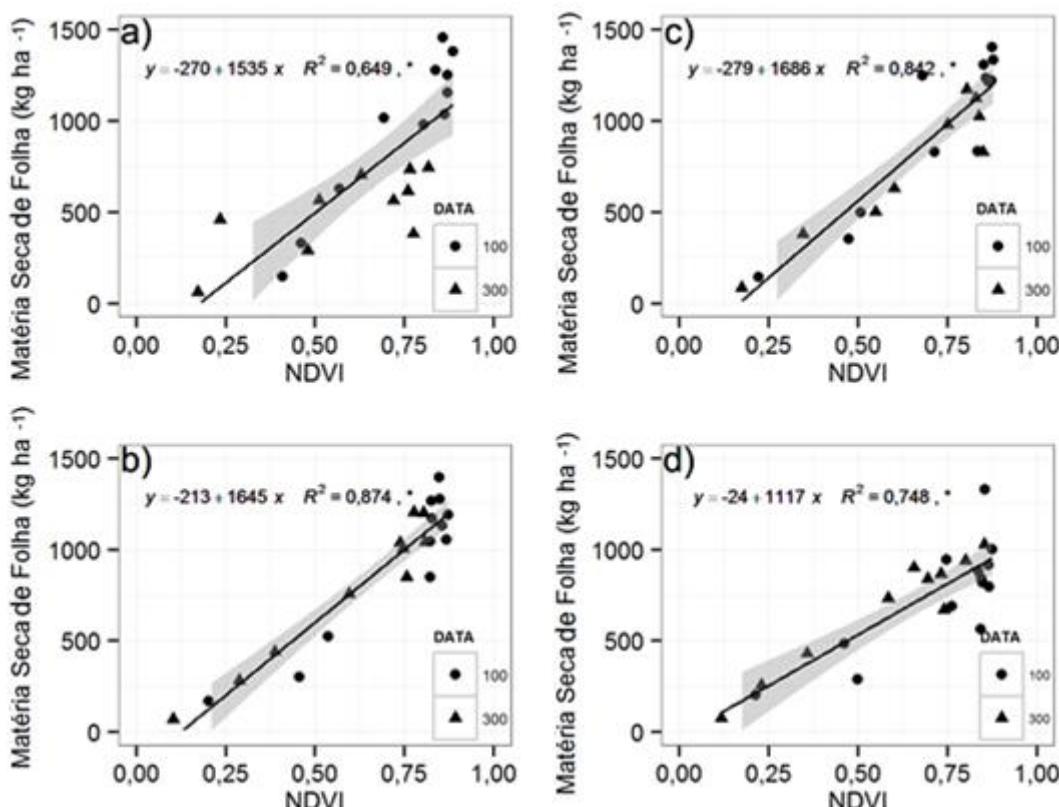


**Figura 26.** Regressões entre a matéria seca de folha e o NDVI na primeira e segunda data de semeadura, respectivamente, para os genótipos BRS Agreste (a e e), Bat 477 (b e f), BRS Pérola (c e g) e BRS Pontal (d e h), em Santo Antônio de Goiás-GO

**Tabela 12.** Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa da matéria seca de folha para os diferentes genótipos em cada data de semeadura (maio – I e junho – II), em Santo Antônio de Goiás-GO

| DT | GENÓTIPO    | $\bar{O}$           | $\bar{P}$ | SD<br>O | SD<br>P | RMSE   | MAE    | EF   | d    | $R^2$ |
|----|-------------|---------------------|-----------|---------|---------|--------|--------|------|------|-------|
|    |             | $\text{kg ha}^{-1}$ |           |         |         |        |        |      |      |       |
| I  | BRS Agreste | 969,59              | 969,59    | 426,60  | 406,19  | 124,32 | 103,70 | 0,91 | 0,97 | 0,907 |
| I  | Bat 477     | 991,00              | 991,00    | 415,10  | 376,32  | 168,33 | 143,23 | 0,82 | 0,95 | 0,822 |
| I  | BRS Pérola  | 969,79              | 969,79    | 429,40  | 391,70  | 168,46 | 128,57 | 0,83 | 0,95 | 0,832 |
| I  | BRS Pontal  | 751,18              | 751,18    | 304,94  | 245,24  | 174,12 | 125,96 | 0,65 | 0,88 | 0,647 |
| II | BRS Agreste | 512,67              | 512,67    | 218,07  | 156,65  | 143,93 | 125,83 | 0,52 | 0,82 | 0,516 |
| II | Bat 477     | 788,70              | 788,70    | 396,24  | 385,95  | 85,12  | 65,37  | 0,95 | 0,99 | 0,949 |
| II | BRS Pérola  | 747,92              | 747,92    | 372,10  | 351,30  | 115,64 | 93,05  | 0,89 | 0,97 | 0,891 |
| II | BRS Pontal  | 674,13              | 689,41    | 317,13  | 319,37  | 82,42  | 49,76  | 0,92 | 0,98 | 0,637 |

DT = data de semeadura;  $\bar{O}$  = média dos valores observados;  $\bar{P}$  = média dos valores preditos; SD O = desvio-padrão dos valores observados; SD P = desvio-padrão dos valores preditos; RMSE = raiz do erro quadrático médio; MAE = erro médio absoluto; EF = coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; d = índice de concordância de Willmott; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.



**Figura 27.** Regressões entre a matéria seca de folha e o NDVI para a média das duas datas de semeadura para os genótipos BRS Agreste (a), Bat 477 (b), BRS Pérola (c) e BRS Pontal (d), em Santo Antônio de Goiás-GO

Quando se analisou conjuntamente todos os dados (duas datas de semeadura e os quatro genótipos) a qualidade do ajuste ainda se manteve adequada (Figura 28 e Tabela

14). O RMSE deste modelo foi de 195,83 kg ha<sup>-1</sup>, enquanto que o MAE foi de 153,01 kg ha<sup>-1</sup>, com a diferença entre a média dos valores observados e preditos sendo igual a zero. Portanto, a matéria seca de folhas pode ser estimada de maneira satisfatória a partir do NDVI independente do genótipo ou data de semeadura, conforme equação 10.

**Tabela 13.** Valores dos índices estatísticos da avaliação dos modelos de estimativa da matéria seca de folha para os diferentes genótipos nas duas datas de semeadura, em Santo Antônio de Goiás-GO

| GENÓTIPO    | $\bar{O}$           | $\bar{P}$ | SD<br>O | SD<br>P | RMSE   | MAE    | EF   | d    | $R^2$ |
|-------------|---------------------|-----------|---------|---------|--------|--------|------|------|-------|
|             | kg ha <sup>-1</sup> |           |         |         |        |        |      |      |       |
| BRS Agreste | 752,01              | 752,01    | 408,75  | 329,20  | 236,45 | 190,95 | 0,65 | 0,89 | 0,649 |
| Bat 477     | 903,04              | 903,04    | 410,77  | 384,13  | 142,32 | 110,95 | 0,87 | 0,97 | 0,874 |
| BRS Pérola  | 874,70              | 874,70    | 411,65  | 377,68  | 159,79 | 124,95 | 0,84 | 0,96 | 0,842 |
| BRS Pontal  | 717,68              | 717,68    | 305,59  | 264,35  | 149,95 | 112,32 | 0,75 | 0,92 | 0,748 |

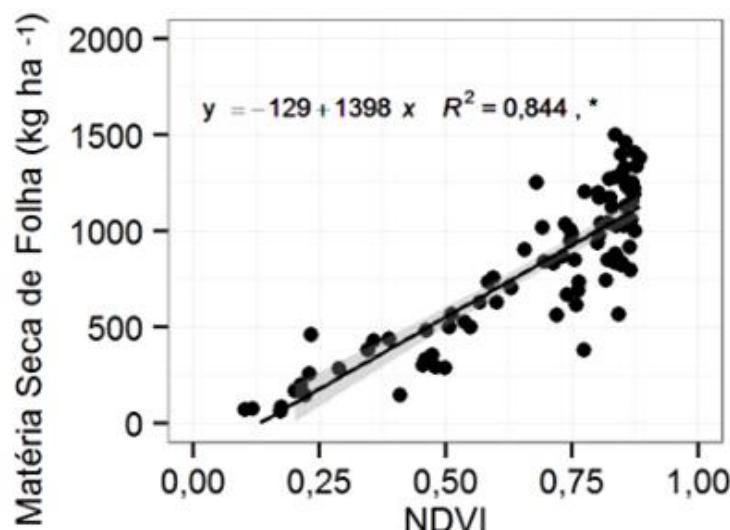
$\bar{O}$  = média dos valores observados;  $\bar{P}$  = média dos valores preditos; SD O = desvio-padrão dos valores observados; SD P = desvio-padrão dos valores preditos; RMSE = raiz do erro quadrático médio; MAE = erro médio absoluto; EF = coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; d = índice de concordância de Willmott; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

$$y = 129 + 1398x \quad (10)$$

Onde:

y = MSF (kg ha<sup>-1</sup>); e

x = NDVI.



**Figura 28.** Regressão entre a matéria seca de folha e o NDVI para a média das duas datas de semeadura e dos quatro genótipos de feijão, em Santo Antônio de Goiás-GO

**Tabela 14.** Valores dos índices estatísticos da avaliação do modelo de estimativa da matéria seca de folha para todos os genótipos e para todas as datas de colheita, em Santo Antônio de Goiás-GO

| VARIÁVEL | $\bar{O}$           | $\bar{P}$ | SD<br>O | SD<br>P | RMSE   | MAE    | EF   | d    | $R^2$ |
|----------|---------------------|-----------|---------|---------|--------|--------|------|------|-------|
|          | kg ha <sup>-1</sup> |           |         |         |        |        |      |      |       |
| MSF      | 811,79              | 811,79    | 387,31  | 313,09  | 195,83 | 153,01 | 0,74 | 0,92 | 0,844 |

$\bar{O}$  = média dos valores observados;  $\bar{P}$  = média dos valores preditos; SD O = desvio-padrão dos valores observados; SD P = desvio-padrão dos valores preditos; RMSE = raiz do erro quadrático médio; MAE = erro médio absoluto; EF = coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; d = índice de concordância de Willmott; e  $R^2$  = coeficiente de determinação.

## **5 CONCLUSÕES**

O NDVI apresentou saturação para as duas datas de semeadura aos 40 dias após a emergência. Na data de semeadura I (17/05/2013) o NDVI saturou-se com valores médios de 0,85 e na data II (03/07/2013) com valores médios de 0,80.

Os genótipos semeados na data II (03/07/2013) apresentaram os menores erros nos modelos, em comparação com os semeados na data I. Entretanto, a estimativa dos parâmetros biofísicos do feijoeiro (IAF, MST, MSC e MSF) a partir do NDVI pode ser determinada independente do genótipo e da data de semeadura com elevado grau de precisão dos modelos.

O RMSE e o MAE se mostraram mais satisfatórios para a avaliação da qualidade dos modelos dentro dos mesmos parâmetros biofísicos, uma vez que a unidade desses índices estatísticos é a mesma do indicador biofísico da cultura. O RMSE e o MAE foram mais precisos, pois o índice de eficiência do modelo (EF), o coeficiente de concordância de Wilmott ( $d$ ) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foram ambíguos em alguns casos. Já entre os diferentes índices a comparação entre melhores e piores modelos é possível somente com EF,  $d$  e  $R^2$ , pois expressam o erro em termos percentuais. Entre os indicadores biofísicos da cultura a MSC foi o melhor parâmetro estimado no modelo geral e a MSF o pior.

## **6 REFERÊNCIAS**

AIDAR, H. **Cultivo do feijoeiro comum: características da cultura.** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. (Sistemas de produção, 2). Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/CultivodoFeijoeiro/>. Acesso em: 15 nov. 2014.

ALBRECHT, J. C.; CARVALHO, W. P. **BRS Pontal:** cultivar de feijoeiro comum de tipo de grão carioca com alto potencial produtivo no Distrito Federal e em Goiás. Embrapa: Planaltina, 2006. (Comunicado Técnico 125).

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements.** Rome, FAO, 1998. 300p. (FAO Irrigation and Drainage, Paper 56).

ALMEIDA JR., E.; ZICKEL, C.; PIMENTEL, R. Caracterização e Espectro Biológico da Vegetação do Litoral Arenoso do Rio Grande do Norte. **Revista de Geografia**, v. 23, n. 3, p. 66- 86, 2009.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANDREI, E. **Compêndio de defensivos agrícolas.** 6. ed. São Paulo: Andrei, 1999.  
ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E. T.; HATFIELD, J. L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**, v. 76, n. 2, p. 300-306, 1984.

ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU E. T.; HATFIELD, J. L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**, v. 76, n. 2, p. 300-306, 1984.

BARBOSA FILHO, M. P.; FAGERIA, N. K.; SILVA, O. F. **Aplicação de nitrogênio em cobertura no feijoeiro irrigado.** EMBRAPA: Santo Antônio de Goiás, 2001. (Circular Técnica, 49)

BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D. TAVASI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI or PAR estimation. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 12, 1989. Vancouver. Proceedings... Ottawa: Canadian Remote Sensing Society, 1989, p.1195-1197.

BORÉM, A.; CARNEIRO, J. E. S. A cultura. In: VIEIRA, C.; PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. (Eds.). **Feijão**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. p. 19-40.

BREUNIG, F. M. Influência da geometria de aquisição sobre índices de vegetação e estimativas de IAF com dados MODIS, Hyperion e simulações PROSAIL para a soja. 2011. 210 folhas. **Tese** (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

CARTER, G. A. Responses of leaf spectral reflectance to plant stress. **American Journal of Botany**, v. 80, n. 3, p. 2310-2343, 1994.

CARVALHO, D. F.; CRUZ, E. S.; SILVA, W. A.; SOUZA, W. J.; ALVES SOBRINHO, T. Demanda hídrica do milho de cultivo de inverno no estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p. 112-118, 2006.

CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? –Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific Model Development**, v. 7, n. 3, p. 1247-1250, 2014.

CHISAKA, H. Weed damage to crops: yield loss due to weed competition. In: FRYER, J. D.; MATSUNAKA, S. (Eds.) **Integrated control of weeds**. Tokyo: Japan Scientific Societies Press, 1977. p. 1-16.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**: grãos, 3º levantamento. Brasília: CONAB, v. 2, n. 3, 2014.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**: grãos, 8º levantamento. Brasília: CONAB, v. 2, n. 8, 2015.

DEERING, D. W. Field measurements of bidirectional reflectance. In: ASRAR, G. (Ed.). **Theory and applications of optical remote sensing**. New York: John Wiley, 1980. p.14-61.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2006. 306p.

EPIPHANIO, J. C. N. Metodologia de aquisição de dados ao nível terrestre. In: ASSUNÇÃO, G. V. **Sensoriamento remoto na agricultura: conceitos básicos, metodologia e aplicações**. São José dos Campos: INPE, 1989. p. 53-73. (INPE-4806-MD/39).

EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R. Sensoriamento remoto de três parâmetros biofísicos de trigo e de feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 10, p. 1615-1624, 1991.

EPIPHANIO, J. C. N.; GLERIANI, J. M.; FORMAGGIO, A. R.; RUDOFF, B. F. T. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 6, p. 445-454, 1996.

EPIPHANIO, J. C. N.; HUETE, A. R. Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effects on fAPAR relationships in alfalfa. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n. 3, p. 351-360, 1995.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de feijão**. 2. ed. Piracicaba: Livroceres, 2007. 386 p.

FAOSTAT – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION. **Bean production**. 2014. Disponível em: <http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E> Produção de feijão. Acesso em: 12 jan. 2015.

FERREIRA, A. G. **Meteorologia Prática**. São Paulo: Oficina de textos, 2006. 188p.

FOLHES, M. T.. Uma aplicação da banda termal do TM/Landsat-5 no gerenciamento dos recursos hídricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos, SP: INPE, 2005. p. 3009-3016.

GALVÃO, L. S.; ROBERTS, D. A.; FORMAGGIO, A. R.; NUMATA, I.; BREUNIG, F. M. View angle effects on the discrimination of soybean varieties and on the relationships between vegetation indices and yield using off-nadir Hyperion data. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 4, p. 846-856, 2009.

GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. R.; ROBERTS, D. A.; BREUNIG, F. M.; TOOMEY, M.; MOURA, Y. M. On intra-annual EVI variability in the dry season of tropical forest: a case study with MODIS and hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 2350-2359, 2011.

GATES, D. M.; KEEGAN, H. J.; SCHALETER, J. C.; WEINDER, V. R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v. 4, p. 11-20, 1965.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; MERZLYAK, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 289-298, 1996.

GITELSON, A. A.; KAUFMAN, Y. J.; STARK, R.; RUNDQUIST, D. Novel Algorithms for Remote Estimation of Vegetation Fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, p. 76 – 87, 2002a.

GITELSON, A. A.; ZUR, Y.; CHIVKUNOVA, O. B.; MERZLYAK, M. N. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. **Photochem. Photobiol.**, v. 75, n. 3, p. 272-281, 2002b.

GOEL, N. S.; REYNOLDS, N. E.. Bidirectional canopy reflectance and its relationship to vegetation characteristics. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n. 1, p. 107-132, 1989.

GONG, P.; PU, R.; BIJING, G. S.; LARRIEU, M. R. Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from hyperion hyperspectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p. 1355-1362, 2003.

GUIMARÃES, C. M. Relações hídricas. In: ARAÚJO, R. S.; RAVA, C. A.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, M. J. O. (Eds.). **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. (p. 139-168). Piracicaba: Potafos, 1996.

GUIMARÃES, C. M.; ZIMMERMANN, M.J. Deficiênciam hídrica em feijão. In: Reunion de Trabajo sobre Mejoramiento en Frijol en Brasil con Enfasis en Tolerancia a Sequia, 1985, Cali. **Anais...** Cali: CIAT, 1985. p.15-28.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometría**. 5<sup>a</sup> ed. Santa Fé, México: McGraw-Hill, 2010. 736p.

GURGEL, H. C.; FERREIRA, N. J.; & LUIZ, A. J. B. Estudo da variabilidade do NDVI sobre o Brasil, utilizando-se a análise de agrupamentos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 85-90, 2003.

GUYOT, G.; GUYON, D.; RIOM, J. Factors affecting the spectral response of forest canopies: a review. **Geocarto International**, v. 4, n. 3, p. 3-18, 1989.

HOLBEN, B. N. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 1417-1434, 1986.

HUETE, A. R. Extension of soil espectral to the satellite: Atmosphere, geometric and sensor considerations. **Photo Interpretation**, New York, v. 34, p. 101-118. 1997.

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

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. J. D. A. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução José Carlos Neves Epiphanio (coordenador), [et al]. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598p.

JUSTICE, C. O.; ECK, T. F.; TANRÉ, D.; HOLBEN, B. N. The effect of water vapour on the normalized difference vegetation index derived for Sahelian region fron NOAA AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 6, p. 1165-1187, 1991.

JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, D. P.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V. V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R. B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; ZHENGMING, W.; HUETE, A. R.; VAN LEEUWEN, W.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J.; LEWIS, P.; BARNSLEY, M. J. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, p. 1228-1249, 1998.

KAUFMAN, Y. J., TANRE, D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS, in **Proc. IEEE Int. Geosci. and Remote Sensing Symp.**, IEEE, New York, 261-270, 1992.

KOZLOWSKI, L.A.; RONZELLI JÚNIOR, P.; PURISSIMO, C.; DAROS, E.; KOEHLER, H.S. Período crítico de interferência das plantas daninhas na cultura do feijoeiro-comum em sistema de semeadura direta. **Planta daninha**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 213-220, 2002.

KRANZ, W.M.; BIANCHINI, A.; LOLLATI, M. A.; MODA-CIRINO, V.; OLIARI, L.; RIBEIRO, P. G. F. **Aptidão fitotécnica e zoneamento de cultivares de feijoeiro no Paraná**. IAPAR, Londrina, Informe da Pesquisa, 1988. 16 p.

KRAUSE, P.; BOYLE, D. P.; BÄSE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. **Advances in Geosciences**, v. 5, n. 5, p. 89-97, 2005.

KUTOS, T.; GOLOB, T.; KAC, M.; PLESTENJAK, A. Dietary fibre content of dry and processed beans. **Food Chem.**, United Kingdom, v. 80, n. 2, p. 231-235, 2003.

LAING, D. R.; KRETCHMER, P. J.; ZULUAGA, S.; JONES, P. G. Field bean. In: **Potential productivity of field crops under different environments**. Los Banos: International Rice Research Institute, 1983. p. 227-48.

LAJOLO, F. M.; GENOVESE, M. I.; MENEZES, E. W. Qualidade nutricional. In: ARAÚJO, R.S.; RAVA, C.A.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, M. J. O. (Coord.). **Cultura do feijoeiro comum no Brasil**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1996. p. 23-56.

LEAL, F. A.; MATRICARDI, E. A. T.; OLIVEIRA, K. A.; ALMEIDA, G. S. Índice de vegetação na estimativa do volume em um povoamento de eucalipto. **Encyclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 1638-1646, 2013.

LEEUWEN, W. J. D.; ORR, B. J.; MARSH, S. E.; HERRMANN, S. M. Multi-sensor NDVI data continuity: uncertainties and implications for vegetation monitoring applications. **Remote Sensing of Environment**, v. 100, p. 67-81, 2006.

LEGATES, D. R.; MCCABE JR, G. J. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, Amsterdam, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999.

LIMA, E. D. A.; JERONIMO, E. S.; LIMA, C. A. A.; GONDIM, P. J. S.; ALDRIGUE, M. L.; CAVALCANTE, L. F. Características físicas e químicas de grãos verdes de linhagens e cultivares de feijão-caipi para processamento tipo conserva. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 129-134, 2003.

MALTHUS, T. J.; MADEIRA, A. C. High resolution spectroradiometry: Spectral reflectance of Field bean leaves infected by Botrytis fabae. **Remote Sensing of Environment**, v. 45, n.1, p. 107-116, 1993.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Estatísticas e dados básicos de economia agrícola**. 2014. Disponível em: <[http://www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/Pasta%20de%20Dezembro%20-%20202014.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/Pasta%20de%20Dezembro%20-%20202014.pdf)>. Acesso em: 14 jan. 2015.

MEIRA, F. A. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio no feijoeiro irrigado cultivado em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 4, p. 383-388, 2005.

MELO C. L. P.; RAGAGNIN V. A.; ARRUDA K. M. A.; BARROS E. G.; CARNEIRO P. C. S.; PAULA JÚNIOR, T. J.; MOREIRA M. A.; CARNEIRO J. E. S. Caracterização fenotípica e molecular de genitores de feijão tipo carioca quanto à resistência a patógenos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 4, p. 495-504, 2008.

MELO, E. S.; BRUM, A. L. O direito ao desenvolvimento e a produção local: O plantio direto da soja como uma alternativa de desenvolvimento econômico. **Revista Gestão e Desenvolvimento em Contexto**, Cruz Alta, v. 1, n. 1, p. 133-154, 2013.

MERCANTE, E.; LAMPARELLI, R. A. C.; URIBE-OPAZO, M. A.; ROCHA, J. V. Modelos de regressão lineares para estimativa de produtividade da soja no oeste do Paraná utilizando dados espectrais. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 504-517, 2010.

MESQUITA, F. R.; CORRÊA, A. D.; ABREU, C. M. P.; LIMA, R. A. Z.; ABREU, A. F. B. Linhagens de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.): composição química e digestibilidade protéica. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 1, p. 1114-1121, 2007.

MEYER, D.; VERSTRAEDE, M. M.; PINTY, P. The effect of surface anisotropy and viewing geometry on the estimation of NDVI from AVHRR. **Remote Sensing Reviews**, v. 12, n. 1, p. 3-27, 1995.

MOISE, E.; RAYMOND, J.; KUHN, J. R. Properties of the Diffuse Neutral Helium in the Inner Heliosphere. **The Astrophysical Journal**, v. 722, n. 2, p. 1411–1415, 2010.

MONTEIRO, P. F. C.; ANGULHO 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**, Brasília, v. 48, n. 4, p. 433-441, 2013.

MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A.; VINING, G. G. **Introduction to linear regression analysis**. 5. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.

MOREIRA, J. A. A. **Estudo da tensão da água do solo para as culturas do feijão, milho e trigo, cultivados em plantio direto, visando a irrigação por aspersão**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 6p.

MOREIRA, M. A. Déficit hídrico na cultura do trigo e o impacto na resposta espectral e em parâmetros agronômicos. Piracicaba, 1997. 142p. **Tese (Doutorado)** - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 3<sup>a</sup> ed. Viçosa: UFV, 2007. 320p..

MYNENI, R. B.; HOFFMAN, S.; KNYAZIKHIN, Y.; PRIVETTE, J. L.; GLASSY, J.; TIAN, Y.; WANG, Y.; SONG, X.; ZHANG, Y.; SMITH, G. R.; LOTSCH, A. FRIEDL, M. MORISSETTE, J. T.; VOTAVA, P.; NEMANI, P. P.; RUNNING, S. W. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 214-231, 2002.

NASCIMENTO, S. P.; BASTOS, E. A.; ARAÚJO, E. C. E.; FILHO, F. R. F. F.; SILVA, E. M. Tolerância ao déficit hídrico em genótipos de feijão-caupi. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 8, p. 853-860, 2011.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. **J. Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto**: princípios e aplicações. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 308 p.

OLIVEIRA, O. M. S.; SILVA, J. F.; FERREIRA, F. M.; KLEHM, C. S.; BORGES, C. V. Associações genotípicas entre componentes de produção e caracteres agronômicos em feijão-caupi. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 4, p. 851-857, 2013.

PEARLMAN, J. S.; BARRY, P. S.; SEGAL, C. C.; SHEPANSKI, J.; BEISO, D.; CARMAN, S. L. Hyperion, a space-based imaging spectrometer. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 41, n. 6, p. 1160-1174, 2003.

PELTIER, M. R.; WILCOX, C; J.; SHARP, D. C. Technical note: Application of the Box-Cox data transformation to animal science experiments. **Journal of Animal Science**, v. 76, p. 847-849, 1998.

PIRES, R.C. M.; ARRUDA, F.B.; FUGIWARA, N.; SAKAI, E.; BORTOLETTO, N. Profundidade do sistema radicular das culturas de feijão e trigo sob pivô central. **Bragantia**, Campinas, v. 50, n. 1, p. 153-162, 1991.

PITELLI, R. A.; DURIGAN, J. C. Terminologia para períodos de controle e de convivência de plantas daninhas em culturas anuais e bianuais. In : CONGRESSO BRASILEIRO DE HERBICIDAS E PLANTAS DANINHAS, 15., 1984, Belo Horizonte. Resumos. Piracicaba: SBHED, 1984. p. 37.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São Jose dos Campos: Parêntese, 2010. 127p.

POVH, F. P.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R.; SALVI, J. V. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 8, p. 1075-1083, 2008.

RAMOS, R. R. D.; LOPES, H. L.; JÚNIOR, J. C. F. M.; CANDEIAS, A. L. B.; FILHO, J. A. S. Aplicação do índice da vegetação por diferença normalizada (NDVI) na avaliação de áreas degradadas e potenciais para unidades de conservação. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. **Anais...** Recife: UFPE, 2010, p. 1-6. Disponível em:  
[https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO\\_CD/artigos/Todos\\_Artigos/A\\_157.pdf](https://www.ufpe.br/cgtg/SIMGEOIII/IIISIMGEO_CD/artigos/Todos_Artigos/A_157.pdf). Acesso em: 12 nov. 2014.

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**, Brasília, v. 47, n. 9, p.1317-1326, 2012.

ROSA, V. G. P.; MOREIRA, M. A.; RUDORFF, B. F. T.; ADAMI, M. Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 1478-1488, 2010.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. **Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS**. In 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351, p. 309–317, 1973.

SALGADO, T. P.; PITELLI, R. A.; ALVES, P. L. C. A.; SALVADOR, F. L.; NUNES, A. S. Efeitos da adubação fosfatada nas relações de interferência inicial entre plantas de milho (*Zea mays*) e de tiririca (*Cyperus rotundus*). **Planta Daninha**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 37-44, 2006.

SANT'ANA, E. V. P.; SANTOS, A. B. dos; SILVEIRA, P. M. Eficiência de uso de nitrogênio em cobertura pelo feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 5, p. 458-462, 2011.

SANTOS, J. B.; GAVILANES, M. L. Botânica. In: VIEIRA, C.; PAULA JÚNIOR, T. J.; BORÉM, A. (Eds). **A cultura do feijão**. 2. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2006. p. 41-65.

SCHOONHOVEN, A.; VOYSEST, O. Breeding for insect in beans. In **Common beans: research for crop improvement**. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Colômbia, 1989. p. 619-647.

SELLERS, P.; DICKINSON, R. E.; RANDALL, D. A.; BETTS, A. K.; HALL, F. G.; BERRY, J. A.; COLLATZ, G. J.; DENNING, A. S.; MOONEY, H. A.; NOBRE, C. A.; SATO, N.; FIELD, C. B.; HENDERSON-SELLERS, A. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. **Science**, v. 275, n. 5299, p. 502-509, 1997.

SHIMABUKURO, Y. E.; NOVO, E. M.; PONZONI, F. G. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasilia, v. 33, Número Especial, p. 1729-1737, 1998.

SILVA NETO, J. L.; SOUZA, J. L.; SILVA, P. T.; TEODORO, I.; SANTOS, E. A.; AMORIM, E. C.; TAVARES, P. S.; LMEIDA, A. C. S.; BRITO, J. E. D. **Análise dos componentes de radiação para três condições de plantio de milho**. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 2008.

SILVA, C. C.; SILVEIRA, P. M.; SILVA, J. G.; AIDAR, H.; MOREIRA, J. A. A. **Informações técnicas para o cultivo de feijão irrigado (GO, DF, MG, ES, SP, RJ).** Goiânia: EMBRAPA-CNPaf, 1989. (Circular técnica 23).

SILVA, H. T.; COSTA, A. O. **Caracterização botânica de espécies silvestres do gênero Phaseolus L. (Leguminosae).** Santo Antônio de Goiás, 2003. 40p.

SILVA, R. G.; CALDAS, I. J. G.; ARAÚJO, A. L. S.; FIGUEIREDO, C. C.; SOUZA, C. H. E.; SILVA, D. G. Adubação com micronutrientes na produtividade e qualidade fisiológica de sementes de cultivares de feijão-comum. **Revista Trópica**, São Luiz, v.1, n. 1, p. 41-49, 2007.

STEFFEN, C. A. **Sensoriamento Remoto:** princípios físicos, sensores e produtos, e sistema Landsat. São José dos Campos: INPE, 1981. 71p.

STEINMETZ, S. **Evapotranspiração máxima no cultivo do feijoeiro de inverno.** Goiânia: EMBRAPA-CNPaf, 1984. 4p.

STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Resposta do feijoeiro ao nitrogênio em cobertura, sob diferentes lâminas de irrigação e preparos do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n.3, p. 473-481, 2001.

TANAJURA, E. L. X, ANTUNES, M. A. H.; UBERTI, M. S. Avaliação de Índices de Vegetação Para a Discriminação de Alvos Agrícolas em Imagens de Satélites. In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Goiânia, 2005. **Anais... XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.** 2005.

THENKABAIL, P. S.; SMITH, R. B.; PAUW, E. Hyperspectral vegetation indices for determining agricultural crop characteristics. **Remote Sensing of Environmental**, New York, v. 71, n. 2, p. 158-182, 2000.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.8, n. 2, p. 127–150, 1979.

VIEIRA, R. F. Avaliação de cultivares de feijão com diferentes graus de precocidade, em Goianira, Goiás. **Revista Ceres**, v. 35, p. 105-112, 1988.

VIHORDO, B. W.; MULLER, L.; EWALD, L. F.; LEÃO, M. L. Hábito de crescimento em feijão Phaseolus vulgaris L. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 79-98, 1980.

WANG, Y.; TIAN, Y.; ZHANG, Y.; EL-SALEOUS, N.; KNYAZIKHIN, Y.; VERMOTE, E.; MYNENI, R. B. Investigation of product accuracy as a function of input and model uncertainties. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 78, n. 3, p. 299-313, 2001.

WARDLOW, B. D.; EGBERT, S. L.; KASTENS, J. H. Analysis of time-series MODIS 250 m vegetation index data for crop classification in the U.S. Central Great Plains. **Remote Sensing of Environment**, v. 108, n. 3, p. 290-310, 2007.

WILLIAMS D. L. A comparison of spectral reflectance properties at the needle, branch, and canopy level for selected conifer species. **Remote Sensing Environment**, v. 35, n. 2-3, p.79-93, 1991.

WILLIAMS, P. C. Implementation of near-infrared technology. In: WILLIAMS, P. C.; NORRIS, K. H. (Eds.). **Near-infrared technology in the agricultural and food industries**. 2. ed. St. Paul: American Association of Cereal Chemists, 2001. p. 145-169.

WILMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Norwich, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

WILMOTT, C. J.; ACLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDEMMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

WILMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 13, p. 2088-2094, 2011.

WRIGHT, D.L.; RASMUSSEN, V.P.; RAMSEY, R.D.; BAKER, D.J.; ELLSWORTH, J.W. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. **GIScience and Remote Sensing**, v.41, p.287-300, 2004.

YOKOYAMA, L. P.; DEL PELOSO, M. J.; DI STÉFANO, J. G.; YOKOYAMA, M. **Nível de aceitabilidade da cultivar de feijão Pérola: avaliação preliminar**. Brasília, DF: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 20 p. (Documentos, 98).

ZHANG, X. Y.; FRIEDL, M. A.; SCHAAF, C. B.; STRAHLER, A. H.; HODGES, J. C. F.; GAO, F.; REED, B. C.; HUETE, A. R. Monitoring vegetation phenology using MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 471-475, 2003.