

## Avaliação de dados de sensoriamento remoto de diferentes períodos na estimativa da produtividade e altura final do trigo (*Triticum aestivum*, L.)

Alexandre Candido Xavier<sup>1</sup>  
Brummer Seda Alvarenga<sup>2</sup>  
Mauricio Alves Moreira<sup>2</sup>  
Bernardo Friedrich Theodor Rudorff<sup>2</sup>  
José Guilherme de Freitas<sup>3</sup>  
Marcus Vinicius Salomon<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Espírito Santo - UFES  
Caixa Postal 16 CEP 29500-000 Alegre – ES, Brasil  
xavier@cca.ufes.br

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12201-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{brummer, mauricio, bernardo}@dsr.inpe.br

<sup>3</sup> Instituto Agronômico Campinas - IAC  
Caixa Postal 28 CEP 13020-902 Campinas - SP, Brasil  
jfreitas@iac.sp.gov.br; salomonmv@hotmail.com

**Abstract.** Remote sensing (RS) data have been used to predict agricultural variables such as leaf area index and crop yield. The main objective of this paper was to analyze the relationship between RS data from different periods and both wheat grain yield and final plant height. The RS data were collected over 80 field plots during five growth stages with the FieldSpec spectroradiometer. The RS variables were individually simulated for TM bands 3 (red) and 4 (near infrared) and, for vegetation indices: Simple Ration (SR), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). For grain yield best results were obtained with SAVI during booting stage with  $R^2=0.60$  and standard error of 387 kg ha<sup>-1</sup>. Final height was also best predicted during booting stage, but this time with the SR index with an  $R^2=0.52$  and standard error of 40.7 cm.

**Palavras-chave:** remote sensing, wheat (*Triticum aestivum*, L.), vegetation indices, sensoriamento remoto, trigo (*Triticum aestivum*, L.), índices de vegetação.

### 1. Introdução

De um modo geral, os sistemas de estimativas de safras utilizam informações de área cultivada e produtividade média. A partir da década de 70, do século passado, dados de sensoriamento remoto têm sido utilizados para a estimativa de área plantada, gerando resultados bastante condizentes com a realidade. Já a produtividade de grãos é uma variável muito complexa para ser estimada, uma vez que depende de diversos fatores culturais e ambientais. Diferentes modelos foram desenvolvidos para estimar a produtividade de culturas agrícolas, entretanto, a grande maioria desses modelos não utiliza variáveis provenientes do sensoriamento remoto. Deste modo, acredita-se que a utilização de dados espectrais das culturas pode melhorar os resultados dos modelos de produtividade. Segundo Rudorff et al. (1998), por causa dessa complexidade ainda não existe uma metodologia operacional para estimar a produtividade de culturas agrícolas fundamentada em dados coletados por sensores remotos.

Os Índices de Vegetação (IVs) são freqüentemente utilizados para estimar parâmetros da vegetação, parâmetros estes que podem ser empregados em modelos (Myneni et al. 1995). A base física dos IVs é atribuída à alta absorção da radiação pela clorofila e ao seu espalhamento pelas folhas, nas regiões espectrais do vermelho e do infravermelho próximo,

respectivamente (Gates et al, 1965). Dentre os IVs usualmente utilizados, destacam-se o SR (Gates et al, 1965) e o NDVI (Rouse et al., 1974) sendo amplamente utilizados na estimativa de biomassa, na estimativa do índice de área foliar, da radiação fotossinteticamente ativa absorvida e da produtividade. Para minimizar o efeito das variações de brilho do solo (“background”), Huete (1988) desenvolveu o SAVI. Estes IVs são sensíveis, de maneira distinta, às variações da resposta espectral nas faixas do vermelho e infravermelho-próximo, de acordo com a forma com que estes índices são calculados.

Deste modo, o objetivo principal deste trabalho foi analisar a relação entre dados de sensoriamento remoto e a produtividade do trigo, assim como com a sua altura final desta cultura. Como objetivos específicos têm-se: i) analisar e definir dentre diversos índices de vegetação (SR, NDVI e SAVI) e bandas individuais (B3 e B4 do sensor TM) àquele que melhor se relacionou com a produtividade e a altura final das plantas de trigo; ii) analisar qual o melhor estágio vegetativo da cultura de trigo para se estimar a produtividade e altura final.

## 2. Material e Métodos

A área de estudo foi a área experimental do Instituto Agrônomo (IAC), em Campinas, São Paulo (S 22° 51' 47", O 47° 04' 42"). A cultura analisada foi o trigo (*Triticum aestivum*, L.), plantado sobre diferentes níveis de adubação (0, 30, 60, 90 e 120 kg de N.ha<sup>-1</sup>) e material genético (IAC-362, IAC-364, IAC-370 e IAC-373), totalizando 80 canteiros. O espaçamento foi de 0,15 m entre linhas com aproximadamente 80 sementes viáveis por metro linear. As adubações de fósforo e potássio foram de 40 e 90 kg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Os micronutrientes boro e zinco foram aplicados nas proporções de 0,5 e 1,0 kg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente. A irrigação foi realizada por aspersão mantendo a capacidade de campo.

Os dados espectrais foram coletados em cinco estádios de desenvolvimento da cultura (**Tabela 1**) com o espectraloradiômetro FieldSpec (Analytical Spectral Device Inc., 2003). Para cada canteiro foi coletada uma medida de reflectância, a uma altura de aproximadamente 1,2 m, utilizando 25° de FOV (“Field of View”) o que resultou em uma área imageada de 0,22 m<sup>2</sup>. A partir destes dados as bandas largas B3 (630-690 nm) e B4 (760-900 nm), referentes ao sensor TM foram simuladas e destas, foram calculados os IVs SR, NDVI e SAVI (Equações 1, 2 e 3, respectivamente), para cada parcela em todos os períodos.

$$SR = \frac{B4}{B3}, \text{ (Gates et al., 1969)} \quad (1)$$

$$NDVI = \frac{B4 - B3}{B4 + B3}, \text{ (Rouse et al., 1974)} \quad (2)$$

$$SAVI = \frac{(B4 - B3)}{(B4 + B3 + L)}(1 + L), \text{ (Huete, 1988)} \quad (3)$$

em que: L = 0,5

Os dados de produtividade e altura final das plantas foram adquiridos ao final do ciclo. Para evitar o efeito da bordadura apenas a parte central de cada canteiro foi colhida, eliminando uma linha de cada lado e 0,5 m em cada extremidade. Deste modo, a área colhida correspondeu a 1,36 m<sup>2</sup>. Após a colheita o trigo foi trilhado e seco até que o teor de umidade na semente atingisse 13%. No ato da colheita foram realizadas medidas de alturas de cinco plantas e obtida a altura média por canteiro.

Tabela 1 – Período analisado e seu respectivo estágio fenológico

Data	Estádio	
23/jul/2003	Afilhos formados	Afilhamento
13/ago/2003	Início do período de emborrachamento	Alongamento
24/ago/2003	Um quarto do processo de espigamento completo	Espigamento
19/set/2003	Final de florescimento, grãos no estágio aquoso	Espigamento
01/out/2003	Grãos duros	Maturação

Para análise de dados foram utilizados os seguintes modelos de regressão:

i) modelo linear:  $y = \beta_0 + \beta_1 x$ ; (4)

ii) modelo exponencial:  $y = \beta_0 \exp^{\beta_1 x}$  e; (5)

iii) modelo potencial  $y = \beta_0 x^{\beta_1}$ , (6)

em que:  $y$  é a variável dependente, sendo a produtividade ( $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) ou a altura das plantas (cm);  $x$  a variável independente, sendo as bandas individuais B3, B4 e os índices de vegetação (SR, NDVI e SAVI); e  $\beta_0$  e  $\beta_1$  são os parâmetros dos modelos. Foi utilizada a análise de resíduo para identificar violação do modelo. As análises das relações  $x$ - $y$  foram feitas por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e  $p$ -value (nível observado de significância) e do erro padrão. Nota-se que para cada  $y$  e período analisado, é apresentado apenas o modelo que apresentou maior  $R^2$ .

### 3. Resultados e Discussão

Quanto aos dados da variável dependente ( $y$ ), produtividade e altura final das plantas verificou-se que variaram entre  $1628 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  a  $5593 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  e entre 58,0 cm a 96,8 cm, respectivamente. Para exemplificar estes dados, são apresentados na **Figura 1** seus respectivos “Boxplot”, não sendo observado assimetria significativa entre os dados destas duas variáveis.

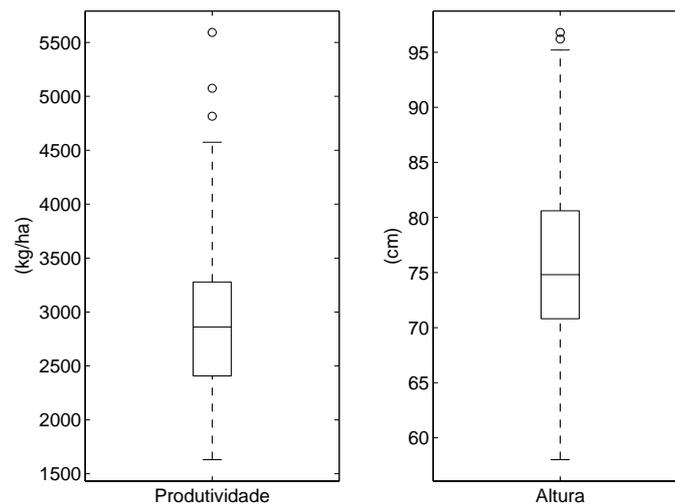


Figura 1 – “Boxplot” para a produtividade e a altura final do trigo.

Na **Tabela 2** são apresentados os modelos que produziram melhor valor de  $R^2$  para estimativa da produtividade do trigo a partir das variáveis independentes e no respectivo período analisado. O IV SR apresentou melhor estimativa da produtividade nos três estádios iniciais, enquanto o SAVI foi melhor estimador nos dois últimos períodos, referentes aos

estádios de espigamento e maturação. Com exceção da relação entre a produtividade e a banda B3, na última data, as demais foram significativas ( $p\text{-value} < 0,05$ ). A variação total da produtividade explicada pelos dados de sensoriamento remoto variou de 10% a 60%, nas relações significativas. Os valores de  $R^2$  foram maiores nas fases de alongamento e espigamento, sendo máximo na fase de espigamento (19/9/2003), com  $R^2 = 0,60$ , utilizando o SAVI com variável independente. Os erros padrões dos modelos variaram em torno dos 450  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . A banda B3 foi o dado de sensoriamento remoto que se mostrou menos eficiente na estimativa da produtividade.

Tabela 2 - Resultado estatístico das bandas individuais e dos IVs como estimadores da produtividade do trigo para cada estágio analisado. Em negrito melhor resultado em determinado estágio com base no  $R^2$ .

Data	x	Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$R^2$	Erro padrão	p-value
23/7/2003	B3	Linear	4459,7	-51589	0,20	529,02	<0,00001
	B4	Linear	1188,6	5294	0,23	492,06	<0,00001
	<b>SR</b>	<b>Linear</b>	<b>1784,0</b>	<b>98,466</b>	<b>0,31</b>	<b>493,95</b>	<b>&lt;0,00001</b>
	NDVI	Linear	-2529,2	6612,1	0,24	513,08	<0,00001
	SAVI	Linear	672,4	4362,6	0,25	490,17	<0,00001
13/8/2003	B3	Potencial	192,9	-0,75877	0,42	422,54	<0,00001
	B4	Linear	310,8	7915,7	0,49	423,9	<0,00001
	<b>SR</b>	<b>Linear</b>	<b>1369,4</b>	<b>130,31</b>	<b>0,57</b>	<b>365,89</b>	<b>&lt;0,00001</b>
	NDVI	Exponencial	205,3	31,681	0,50	389,11	<0,00001
	SAVI	Exponencial	959,5	21,034	0,46	425,36	<0,00001
24/8/2003	B3	Potencial	344,0	-0,62676	0,39	443,84	<0,00001
	B4	Linear	41,40	9097,6	0,51	401,01	<0,00001
	<b>SR</b>	<b>Linear</b>	<b>1532,2</b>	<b>141,68</b>	<b>0,59</b>	<b>369,73</b>	<b>&lt;0,00001</b>
	NDVI	Exponencial	429,7	23,907	0,47	408,93	<0,00001
	SAVI	Exponencial	942,7	22,545	0,54	400,27	<0,00001
19/9/2003	B3	Linear	4835,5	-21906	0,34	473,28	<0,00001
	B4	Linear	-523,2	14860	0,47	408,97	<0,00001
	SR	Linear	1677	433,37	0,53	418,00	<0,00001
	NDVI	Linear	882,2	4525,7	0,54	414,87	<0,00001
	<b>SAVI</b>	<b>Linear</b>	<b>938,8</b>	<b>7520,7</b>	<b>0,60</b>	<b>387,01</b>	<b>&lt;0,00001</b>
1/10/2003	B3	Linear	2217,2	4894,9	0,013	522,16	0,31569
	B4	Exponencial	1479,9	29,469	0,10	542,37	0,00525
	SR	Linear	-222,2	1882	0,14	512,56	0,000813
	NDVI	Linear	1235,3	6766,5	0,13	513,83	0,001157
	<b>SAVI</b>	<b>Linear</b>	<b>1200,7</b>	<b>11110</b>	<b>0,17</b>	<b>512,94</b>	<b>0,000184</b>

Na **Figura 2** são apresentadas as melhores relações para estimativa da produção de trigo nos diferentes estádios analisados. Como esperado, as relações entre a produtividade e os IVs foram positivas, uma vez que estes respondem crescentemente à biomassa verde sendo esta, por sua vez, associada positivamente à produtividade (Asrar et al. 1984). Pode-se observar também o menor ajuste no primeiro e no último período, referentes aos estádios de afilhamento (23/7/2003) e maturação (1/10/2003).

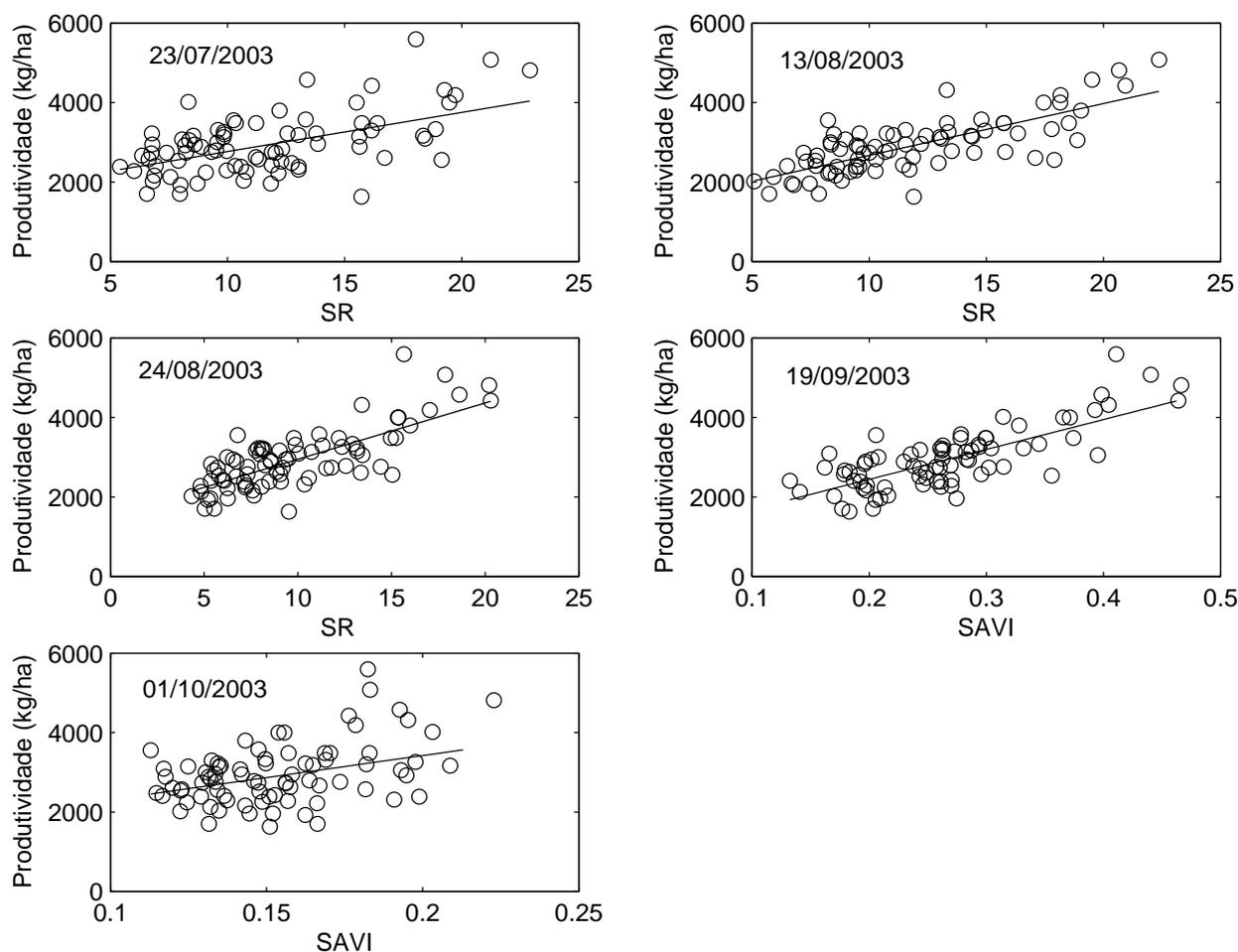


Figura 2 – Diagrama de dispersão entre o melhor dado de sensoriamento remoto e a produtividade do trigo nos diferentes estádios de desenvolvimento.

Quanto aos dados de sensoriamento remoto para estimar a altura final das plantas, verificou-se, de maneira geral, valores inferiores de  $R^2$  (**Tabela 3**) quando comparados aos encontrados nas relações destes com a produtividade (**Tabela 2**). Com exceção das variáveis independentes B3 e B4 do último período, todas as relações foram significativas ( $p\text{-value} < 0,05$ ). A maior explicação da variação da altura final das plantas (52%) foi obtida em 24/08/2004, período de espigamento, a partir de um modelo linear tendo como variável independente o IV SR. O IV SR apresentou maior  $R^2$  na estimativa da altura das plantas nos três primeiros períodos, enquanto o IV SAVI foi melhor nos últimos dois períodos. Nota-se que este resultado é idêntico ao encontrado nas relações para se estimar a produtividade.

A altura final das plantas de trigo foi melhor explicada, na sua grande maioria, pelo modelo matemático do tipo linear. Quanto ao erro padrão, verificou-se que foi sempre superior a 40 cm. Como na relação entre dados de sensoriamento remoto e produtividade de trigo, aqui também se verifica maiores valores de  $R^2$  entre os períodos de alongamento e espigamento.

Tabela 3 - Resultado estatístico das bandas individuais e dos IVs como estimadores da altura final das plantas de trigo para cada estágio analisado. Em negrito melhor resultado em determinado estágio com base no  $R^2$ .

Data	$x$	Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$R^2$	Erro padrão	$p$ -value
23/7/2003	B3	Potencial	33,883	-0,22733	0,20	58,163	<0,00001
	B4	Linear	55,024	62,886	0,29	48,237	<0,00001
	<b>SR</b>	<b>Linear</b>	<b>62,844</b>	<b>11,061</b>	<b>0,36</b>	<b>47,602</b>	<b>&lt;0,00001</b>
	NDVI	Linear	12,891	76,38	0,27	52,552	<0,00001
	SAVI	Linear	48,359	53,324	0,30	48,945	<0,00001
13/8/2003	B3	Potencial	29,449	-0,26627	0,28	50,729	<0,00001
	B4	Linear	51,338	73,5	0,41	46,068	<0,00001
	<b>SR</b>	<b>Linear</b>	<b>60,413</b>	<b>13,093</b>	<b>0,47</b>	<b>44,66</b>	<b>&lt;0,00001</b>
	NDVI	Linear	0,34241	91,277	0,38	49,474	<0,00001
	SAVI	Linear	44,038	60,951	0,42	46,114	<0,00001
24/8/2003	B3	Potencial	30,936	-0,26457	0,38	49,025	<0,00001
	B4	Linear	48,909	85,459	0,38	49,32	<0,00001
	<b>SR</b>	<b>Linear</b>	<b>61,831</b>	<b>14,023</b>	<b>0,52</b>	<b>40,689</b>	<b>&lt;0,00001</b>
	NDVI	Linear	19,397	71,45	0,39	47,963	<0,00001
	SAVI	Linear	45,357	62,351	0,40	47,332	<0,00001
19/9/2003	B3	Potencial	44,206	-0,21323	0,29	50,534	<0,00001
	B4	Linear	48,406	116,98	0,27	52,136	<0,00001
	SR	Linear	64,612	36,817	0,38	48,111	<0,00001
	NDVI	Linear	57,654	38,779	0,38	47,935	<0,00001
	<b>SAVI</b>	<b>Linear</b>	<b>58,992</b>	<b>61,324</b>	<b>0,39</b>	<b>47,14</b>	<b>&lt;0,00001</b>
1/10/2003	B3	Linear	77,997	-17,424	0,00	61,48	0,76306
	B4	Linear	64,943	48,333	0,03	61,483	0,15691
	SR	Linear	49,113	15,963	0,08	59,362	0,012453
	NDVI	Linear	61,202	58,491	0,08	59,485	0,013296
	<b>SAVI</b>	<b>Linear</b>	<b>62,295</b>	<b>86,884</b>	<b>0,08</b>	<b>59,166</b>	<b>0,009883</b>

Na **Figura 3** são apresentadas as melhores relações entre os dados de sensoriamento remoto e a altura final das plantas de trigo para todos os estágios analisados. Semelhante ao obtido para a produtividade (**Figura 2**) as relações foram positivas para a relação entre os IVs SR e SAVI e a produtividade, visto que é esperado que as alturas de plantas são diretamente proporcionais à quantidade de biomassa. Pode-se observar também a queda do ajuste do modelo aos dados no primeiro (23/7/2003) e no último período (1/10/2003) analisados, que correspondem aos estágios de afilhamento e maturação.

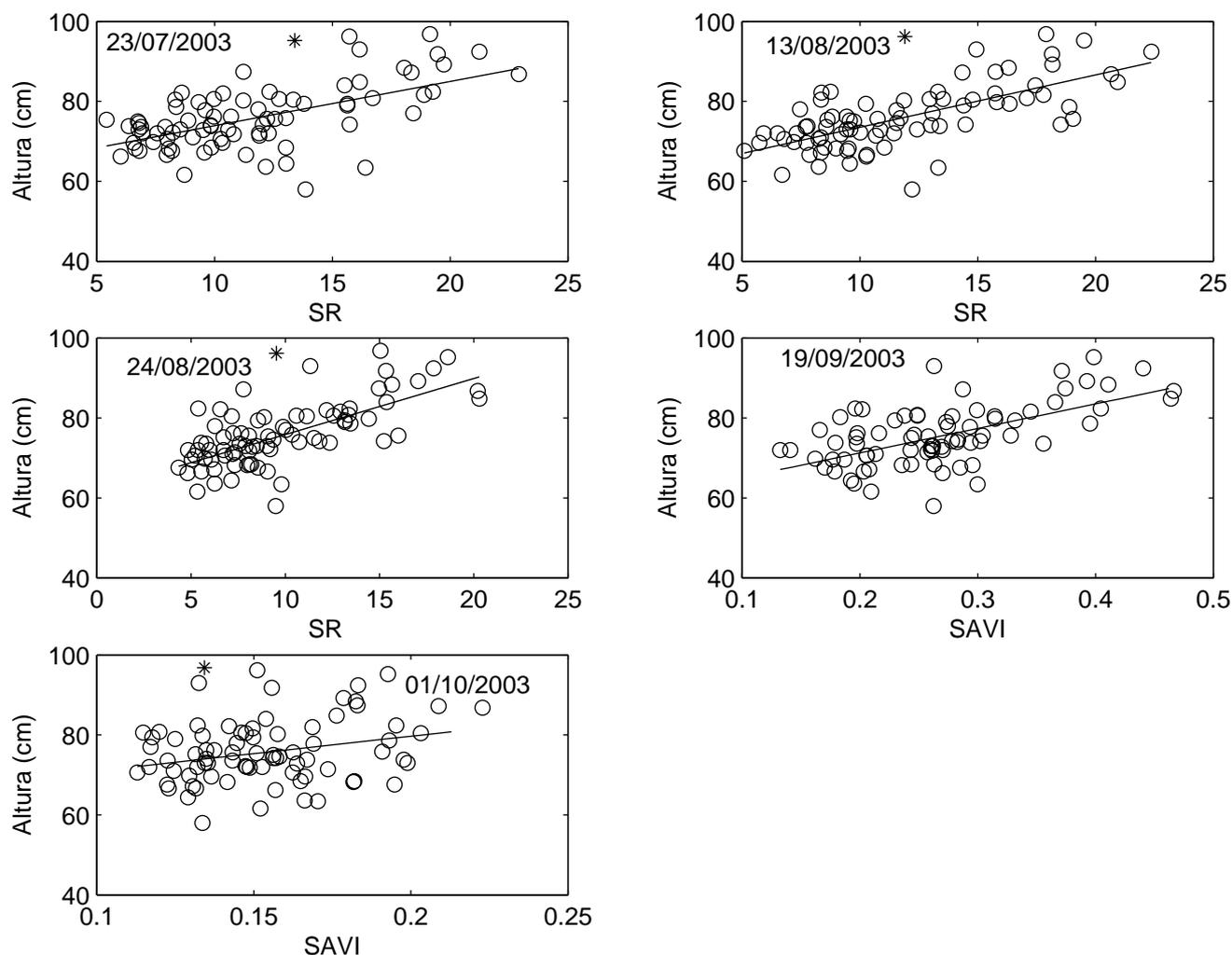


Figura 3 – Diagrama de dispersão entre o melhor dado de sensoriamento remoto e altura final de plantas de trigo nos diferentes estádios de desenvolvimento.

#### 4. Conclusões

Neste trabalho foram apresentadas as relações entre dados de sensoriamento remoto e, a produtividade e a altura final de plantas do trigo. Verificou-se que a variação máxima da produtividade e da altura final explicada pelos dados de sensoriamento remoto de banda larga foi de 60% e 52%, respectivamente, para dados coletados durante o estágio de espigamento. Os estádios de afilamento e maturação apresentaram a menor capacidade de estimar as variáveis da cultura estudada.

#### Referências

- Analytical Spectral Device Inc. FieldSpec® FR Portable Spectroradiometer. [online]. 2003. <[www.asdi.com/asdi\\_t2\\_pr\\_sp\\_fsp.html](http://www.asdi.com/asdi_t2_pr_sp_fsp.html)>. Acesso em: 14 fev. 2003.
- 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, p. 300-306, Jun. 1984.
- Gates, D.M.; Keegan, J.H.; Schleter, J.C.; Weidner, V.R. Spectral properties of plants. **Applied Optics**, v.4, p.11-20, 1965.
- Huete, A.R.; Jackson, R.D. Soil and atmosphere influences on the spectra of canopies. **Remote Sensing of Environment**, 25 (1):89-105, 1988.

Myneni, R.B.; Maggion, S.; Jaquinta, J.; Privette, J.L.; Gobron, N.; Pinty, B.; Kimes, D.S.; Verstraete, M.M.; Willams, D.L. Optical remote sensing of vegetation: modeling, caveats, and algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v.51, p.169–188, 1995.

Rouse, J.W. JR.; Haas, R.H.; Deering, D.W.; Schell, J.A.; Harlan, J.C. **Monitoring the vernal advancement and retrogration (green wave effect) of natural vegetation**, NASA/GSFC type III final report: Greenbelt, Maryland, NASA, 371 p. 1974.

Rudorff, B.F.T.; Moreira, M.A.; Oviedo, A.F.P.; Freitas, J.G. Efeito do nitrogênio e do déficit hídrico na resposta espectral de cultivares de trigo. In: Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, 8. **Anais**. Mérida, Venezuela. Jul. 1998. CD-ROM, p. 9.