

## Calibração do índice de colheita (Cc) para estimativa de produtividade atingível da cultura da soja

Jonathan Richetti<sup>1</sup>  
Jerry Adriani Johann<sup>1</sup>  
Glauco de Souza Rolim<sup>2</sup>  
Miguel Angel Uribe-Opazo<sup>1</sup>  
Willyan Ronaldo Becker<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE  
Rua Universitária, 2069, CEP 85819-110- Cascavel - PR, Brasil  
{j\_richetti, jerry.johann, willyanbecker}@hotmail.com, miguel.opazo@unioeste.br

<sup>2</sup> Universidade Estadual Paulista – UNESP  
Rodovia Prof. Paulo Donato Castellane, s/n, CEP 14884-900 – Jaboticabal - SP  
rolim@fcav.unesp.br

**Abstract.** This paper aims the estimation of soybean yield in the State of Paraná using cropmodels and meteorological data from ECMWF. For that, a calibration of the harvest index (Cc) for soybean yield models from remotely sensed data were made. For this work, eight farm areas, in the State of Paraná (south of Brazil), with soybean yield production, were monitored during at least one year. With this information, the harvest index was determined through two diverse methodologies for water balance and real evapotranspiration (ET<sub>a</sub>), and the FAO yield model for the yield estimations. For determining some of the seeding and harvesting dates, the EVI from MODIS were used, all other dates were collected from the proprietaries owners. For agrometeorological data, ET<sub>0</sub> and Precipitation, was from ECMWF (European Centre of Medium Weather Forecast). The real yield data were used for calibrating two different harvest index, one with FAO methodology and another with TM methodology. After that, soybean yield were estimated for the proprietaries using the remotely sensed data and both obtained index. For comparing the real yield and the estimated yields, the t-student test were applied. The t-student test shows that the estimated yield from with the values of harvest index are statistically equal to those of real yield. I.e., we can use the values of harvest index of each method to estimate the actual productivity.

**Palavras-chave:** Water Balance, Temporal Series, MODIS, Parana, FAO, Thornthwaite e Mather; Balanço hídrico, Séries Temporais, MODIS, Paraná, FAO Thornthwaite e Mather

### 1. Introdução

A soja é a principal *commodity* brasileira, apresentando uma produção, no ano-safra 2012/13, de 81.281 milhões de toneladas e o Paraná foi responsável por 19,5% dessa produção, com 15.855 milhões de toneladas. É, portanto, um dos estados mais importantes na produção nacional, além disso, o estado apresentou a segunda maior produtividade de soja do país, com 3,34 t ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2013). Devido a sua importância, tanto para o estado quanto para o país, o aprimoramento de estudos que visem aumentar a produtividade dessa cultura se faz necessário e contínuo.

Para realização de estimativas de produtividade de soja faz-se o uso de modelos. A construção destes modelos exige inicialmente o entendimento das fases fenológicas das culturas, bem como sua resposta às condições agrometeorológicas, buscando uma possível explicação matemática para a relação entre estes fatores. Diversos autores apresentam modelos de produtividade utilizando dados de sensoriamento remoto (Baruth et al., 2006; Bolton & Friedl, 2013; Tao et al., 2005) para reduzir a subjetividade e melhorar a precisão e confiabilidade das estimativas gerados.

Segundo Kemanian et al. (2007) existem várias formas para estimar a produtividade de grãos. Primeiro, simulando diretamente a produtividade, e segundo, simulando a fração, ou partição, de biomassa aérea total atribuída ao grão (índice de colheita). A primeira forma é dispendiosa e baseia-se na observação empírica do crescimento durante uma janela de tempo crítico da cultura, ou seja, durante as fases fenológicas da cultura e, também, está relacionada

com o número de grãos por planta ou por unidade de área. A segunda forma utiliza-se do índice de colheita ( $C_c$ ) que simplifica essas relações simulando finalmente a produtividade.

Para que os modelos apresentem funcionalidade é imprescindível a o processo de calibração. Para calibração de um modelo utilizam-se dados reais obtidos em campo em comparação com os dados reais estimados pelo modelo. Desta forma, faz-se necessário o uso de um índice para corrigir o modelo para que os dados estimados estejam mais próximos dos valores reais. Para a calibração de modelos de produtividade, como o proposto por Allen et al. (1998), utiliza-se o índice de colheita ( $C_c$ ). Quanto mais confiável for o índice, mais próximos da realidade serão os resultados obtidos com os modelos.

Kemarian et al. (2007) apresentaram métodos de simulação do índice de produtividade que são recomendáveis quando existem limitação para obtenção de informações de campo.

Este trabalho tem como objetivo a calibração do índice de colheita ( $C_c$ ) para estimativa de produtividade atingível da cultura da soja no estado do Paraná. Para isso foram utilizados dados reais de produtividade em áreas monitoradas, dados de solo e agrometeorológicos obtidos por sensoriamento remoto e o modelo de produtividade FAO (Allen et al., 1998).

## 2. Metodologia do Trabalho

Para a calibração dos índices de produtividade foram utilizadas oito propriedades com dados reais ( $Y_{real}$ ) de produtividade no estado do Paraná (Tabela 1 e Figura 1) entre os anos-safras 2007/2008 e 2012/2013.

Tabela 1. Dados de área (ha), data de semeadura, data de colheita e produtividade  $Y_{real}$  ( $kg\ ha^{-1}$ ) das propriedades monitoradas.

Propriedades	Área (ha)	Data de Semeadura	Data de Colheita	$Y_{real}$ ( $kg\ ha^{-1}$ )
1	53	08/10/2007*	10/02/2008*	3389
1	53	29/09/2008*	10/02/2009*	1892
1	53	30/09/2009	10/02/2010	3515
1	53	30/09/2010	26/02/2011	3353
1	53	30/09/2011	10/02/2012	1250
1	53	05/10/2012	22/01/2013	3713
2	162	30/09/2007*	17/01/2008*	2995
2	162	13/09/2008*	17/01/2009*	2385
2	162	16/10/2010	18/02/2011	3563
2	162	22/09/2011	02/02/2012	2203
2	162	07/10/2012	25/01/2013	3252
3	110	06/11/2012	02/03/2013	3395
4	22	18/01/2013	27/04/2013	2459
5	23	18/01/2013	24/04/2013	2362
6	71	07/11/2012	18/03/2013	3973
7	73	16/11/2012	19/03/2013	4332
8	81	16/11/2012	25/03/2013	4159

\* Datas obtidas por perfil temporal de EVI

Algumas datas, de semeadura e colheita, não foram registradas pelos produtores, portanto, foi necessária a obtenção dessas datas para execução do balanço hídrico da cultura. O método utilizado foi apresentado por Becker (2013) e Grzegozewski et al. (2013) que, por meio do perfil temporal de EVI foi determinado o ciclo da cultura, data de semeadura, pico vegetativo e data de colheita.

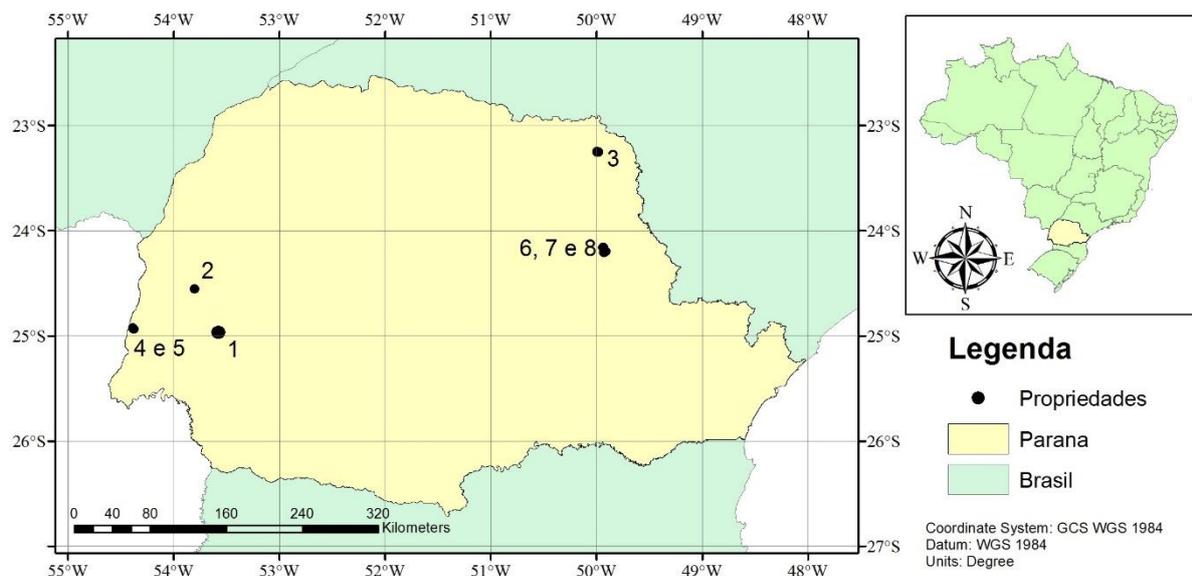


Figura 1. Propriedades agrícolas monitoradas para a calibração do índice de colheita ( $C_c$ ) no Estado do Paraná.

O modelo calibrado foi o modelo FAO (Allen et al, 1998) utilizando-se de dois métodos para a determinação da evapotranspiração real da cultura. Um dos métodos utilizados foi apresentado por Thornthwaite e Mather (1955) e o outro de Penman-Monteith modificado por Allen et al. (1998). Os dados agrometeorológicos de temperatura média diária do ar, precipitação e  $ET_0$  foram obtidos do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) e os dados de solo do Novo Mapa de Solos do Brasil (Embrapa, 2011).

O modelo utilizado pela FAO (Equação 1) propõe uma equação simples em que a redução relativa da produtividade está relacionada com a correspondente redução relativa da evapotranspiração.

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_c}\right) \quad (1)$$

em que:  $Y_x$  e  $Y_a$  são, respectivamente, produtividade potencial e produtividade atingível ( $t\ ha^{-1}$ );  $ET_c$  e  $ET_a$  são os valores máximo e atual de evapotranspiração (mm);  $K_y$  é o fator de produtividade que representa a sensibilidade da produtividade da cultura a estresses hídricos (adimensional).

No cálculo de  $Y_x$  (Equação 2) o índice de colheita é utilizado para a calibração deste valor sendo possível determinar o valor de produtividade potencial.

$$Y_x = \sum(Ciaf * Cr * Cc * PPR) \quad (2)$$

em que:  $Ciaf$  é a correção para índice de área foliar (adimensional);  $Cr$  é a correção para a respiração (adimensional);  $Cc$  é índice de colheita (adimensional);  $PPR$  é a produtividade potencial bruta por período ( $t\ ha^{-1}\ dia^{-1}$ )

Os valores de  $Cr$  são dependentes da temperatura, os valores de  $Ciaf$  são calculados a partir do índice de área foliar e a  $PPR$  é calculada pelo foto-período sob correção para dias nublados ou limpos.

Os valores de  $K_y$  são apresentados em tabelas, dependo da cultura pela FAO (Allen et al, 1998), bem como os procedimentos para o cálculo da máxima evapotranspiração (Equação 3).

$$ET_c = K_c ET_o \quad (3)$$

em que:  $ET_c$  é a evapotranspiração máxima (mm);  $K_c$  é o fator da cultura (adimensional; tabelas FAO);  $ET_o$  é a evapotranspiração de referência (mm).

Os valores de  $ET_o$  foram obtidos do ECMWF, que apresentam uma resolução espacial aproximada de 25 km e uma resolução temporal de 10 dias.



proposto pela FAO (BHFAO) e o método de Thornthwaite e Mather (BHTM) para o cálculo de  $ET_a$  e, conseqüentemente, o cálculo da produtividade potencial ( $Y_x$ ) pois esses modelos simulam de forma diferenciada a quantidade de água disponível no perfil dos solos.

Tabela 2. Índices de colheita (Cc) e produtividade potencial ( $Y_x$ ) estimados para cada ano e valor de produtividade real ( $Y_{real}$ ) obtida à campo.

Propriedades	$Y_{real}$ (kg ha <sup>-1</sup> )	$Y_x$ BHFAO (kg ha <sup>-1</sup> )	$Y_x$ BHTM (kg ha <sup>-1</sup> )	Cc BHFAO	Cc BHTM
1	3389	5310	3467	0,2875	0,1877
1	1892	2913	2225	0,1605	0,1226
1	3515	4905	4077	0,2685	0,2232
1	3353	4983	3409	0,2431	0,1663
1	1250	1796	1535	0,0996	0,0851
1	3713	5801	4245	0,4286	0,3136
2	2995	3831	3473	0,2992	0,2713
2	2385	4417	2722	0,2992	0,1844
2	3563	4539	3703	0,2525	0,2060
2	2203	4252	2709	0,2388	0,1522
2	3252	4594	3671	0,3485	0,2785
3	3395	4737	3707	0,2970	0,2324
4	2459	4304	2468	0,2981	0,1709
5	2362	4135	2370	0,2864	0,1642
6	3973	5875	4377	0,3334	0,2484
7	4332	5484	4397	0,3113	0,2496
8	4159	5266	4221	0,2989	0,2396
<b>Média</b>	<b>3070</b>	<b>4537</b>	<b>3339</b>	<b>0,2795</b>	<b>0,2056</b>
<b>Mínimo</b>	<b>1250</b>	<b>1796</b>	<b>1535</b>	<b>0,0996</b>	<b>0,0851</b>
<b>Máximo</b>	<b>4332</b>	<b>5875</b>	<b>4397</b>	<b>0,4286</b>	<b>0,3136</b>
<b>DP</b>	<b>850</b>	<b>1023</b>	<b>856</b>	<b>0,0721</b>	<b>0,0596</b>
<b>CV(%)</b>	<b>27,70</b>	<b>22,55</b>	<b>25,64</b>	<b>25,80</b>	<b>28,96</b>

BHFAO utilizando o método proposto por Allen et al. (1998); BHTM utilizando o método proposto por Thornthwaite e Mather (1955); DP: desvio padrão; CV coeficiente de variação.

Relacionando a produtividade real ( $Y_{real}$ ) com o índice de colheita (Cc) obtido pelo método BHFAO observa-se que embora exista uma tendência linear (Figura 3), o coeficiente de correlação de Pearson foi considerado moderado ( $r = 0,683$ ). Tendência semelhante ocorreu quando foi relacionado os valores da produtividade real ( $Y_{real}$ ) com o índice colheita (Cc) obtido pelo método BHTM, contudo, com uma correlação maior ( $r = 0,787$ ) (Figura 4).

Fica claro que quanto maiores forem os valores de Cc, maiores serão os valores de produtividade. Quando se relaciona os índices, pelo método BHFAO e pelo método BHTM, observou-se uma correlação ( $r = 0,884$ ) alta (Figura 5). Além disso, observa-se que os valores do índice pelo método BHFAO são maiores do que os valores do índice pelo método BHTM. Essa diferença é explicável, já que o método BHFAO apresenta uma penalização mais acentuada no balanço hídrico do que o método BHTM, assim os valores foram em média superiores.

Sendo que as amplitudes apresentadas por eles são diferentes, os valores pelo método BHFAO são entre 0,10 e 0,43 (amplitude de 0,33) enquanto os valores pelo método BHTM permanecem entre 0,09 e 0,31 (amplitude de 0,22).

Estimou-se a produtividade real utilizando-se os valores médios de índice de colheita Cc BHFAO de 0,2795 e Cc BHTM de 0,2056 para todas as áreas e ano (Tabela 2) para observar as diferenças em relação a produtividade real (Tabela 3). Em média a diferença entre as médias é baixa, contudo existem diferenças elevadas para ambos os métodos em épocas em que a produtividade real foi baixa. Até o momento, o trabalho apresenta um bom resultado

para o índice de produtividade para a soja no estado do Paraná, divergindo, em média apenas 71 kg ha<sup>-1</sup> pelo método BHFAO e 27 kg ha<sup>-1</sup> pelo método BHTM.

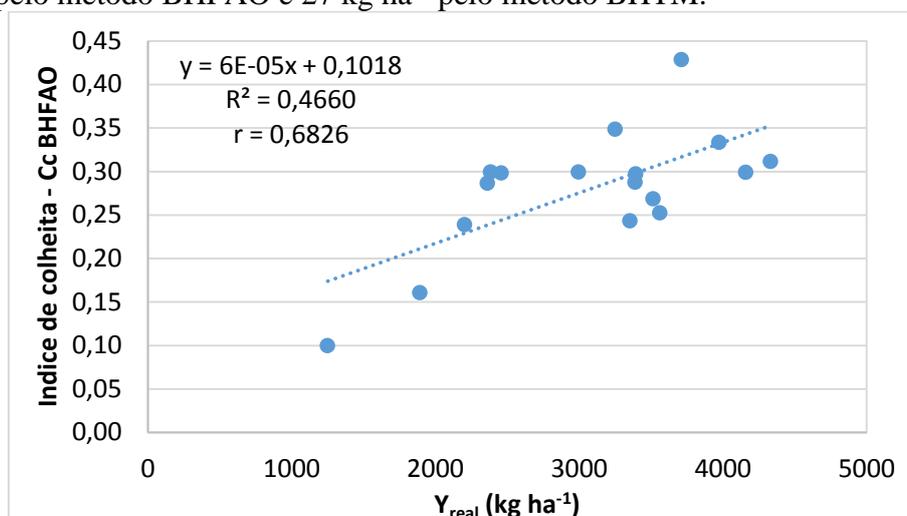


Figura 3. Relação entre a produtividade real ( $Y_{real}$ ) e o índice de colheita Cc BHFAO utilizando o método proposto por Allen et al. (1998)

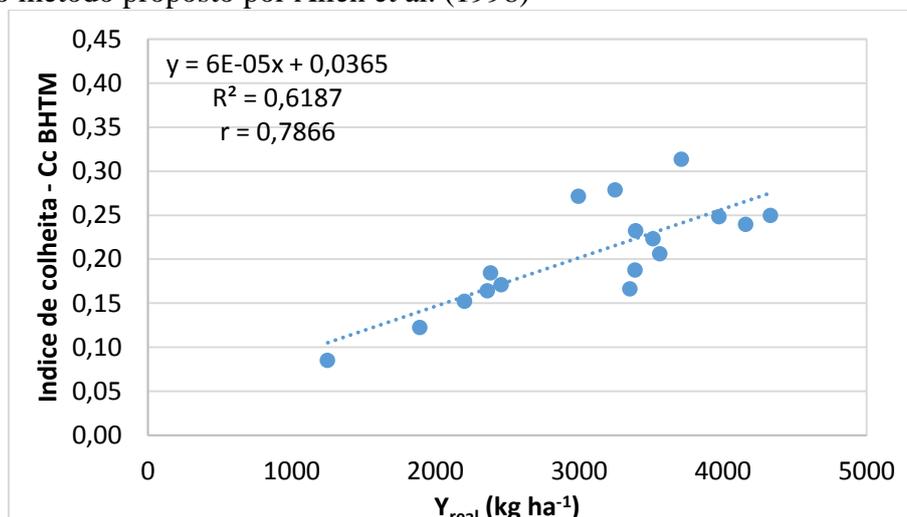


Figura 4. Relação entre a produtividade real ( $Y_{real}$ ) e o índice de colheita Cc BHTM utilizando o método proposto por Thornthwaite e Mather (1955).

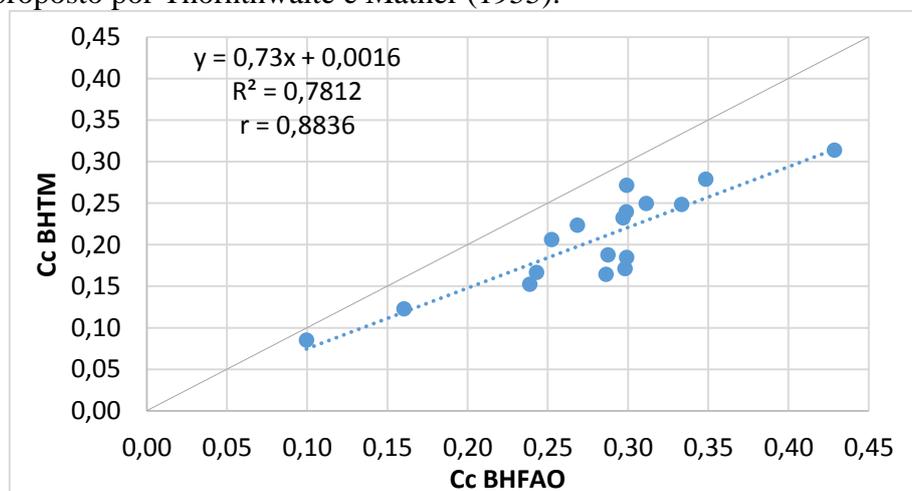


Figura 5. Relação entre os índices de colheita Cc utilizando os métodos propostos por: BHFAO - Allen et al, (1998); BHTM - Thornthwaite e Mather (1955).

Tabela 3. Produtividades estimadas e a diferença entre a produtividade real -  $Y_{real}$  ( $kg\ ha^{-1}$ ) e as produtividades atingíveis estimadas -  $Y_a$  ( $kg\ ha^{-1}$ ) pelos métodos propostos por BHFAO - Allen et al. (1998) e BHTM - Thornthwaite e Mather (1955).

Propriedades	Ano-safra	$Y_{real}$ ( $kg\ ha^{-1}$ )	$Y_a$ BHFAO ( $kg\ ha^{-1}$ )	$Y_a$ BHTM ( $kg\ ha^{-1}$ )	$Y_{real} - Y_a$ BHFAO	$Y_{real} - Y_a$ BHTM
1	2007-2008	3389	3295	3712	-94	323
1	2008-2009	1892	3296	3174	1404	1282
1	2009-2010	3515	3659	3238	144	-277
1	2010-2011	3353	4145	3856	792	503
1	2011-2012	1250	3507	3020	2257	1770
1	2012-2013	3713	2422	2434	-1291	-1279
2	2008-2009	2995	2798	2269	-197	-726
2	2009-2010	2385	2228	2659	-157	274
2	2010-2011	3563	3944	3556	381	-7
2	2011-2012	2203	2578	2977	375	774
2	2012-2013	3252	2608	2401	-644	-851
3	2012-2013	3395	3196	3004	-199	-391
4	2012-2013	2459	2306	2958	-153	499
5	2012-2013	2362	2306	2958	-56	596
6	2012-2013	3973	3331	3289	-642	-684
7	2012-2013	4332	3889	3568	-443	-764
8	2012-2013	4159	3889	3568	-270	-591
	<b>Média</b>	<b>3070</b>	<b>3141</b>	<b>3096</b>	<b>71</b>	<b>27</b>
	<b>Mínimo</b>	<b>1250</b>	<b>2228</b>	<b>2269</b>	<b>-1291</b>	<b>-1279</b>
	<b>Máximo</b>	<b>4332</b>	<b>4145</b>	<b>3856</b>	<b>2257</b>	<b>1770</b>
	<b>DP</b>	<b>850</b>	<b>648</b>	<b>470</b>	<b>822</b>	<b>826</b>
	<b>CV(%)</b>	<b>27,70</b>	<b>20,64</b>	<b>15,19</b>	<b>1157,94</b>	<b>3113,72</b>

BHFAO - Allen et al. (1998); BHTM - Thornthwaite e Mather (1955). DP: desvio padrão; CV coeficiente de variação.

Os testes de comparação de médias indicam que não houve diferença estatística significativa ( $p$ -valores superiores à 0,05) entre os valores de produtividade atingíveis, tanto pelo método BHFAO quanto pelo método BHTM e a produtividade real, bem como entre as produtividades atingíveis entre si, conforme Tabela 4. Calculadas utilizando-se dos valores de  $Cc$ 's calculados, de forma que, as produtividades atingíveis estimadas são estatisticamente iguais aos valores das produtividades reais.

Tabela 4. P-valores para os testes T-Student para comparação de médias de amostras independentes, entre  $Y_{real}$  vs  $Y_a$  BHFAO;  $Y_{real}$  vs  $Y_a$  BHTM e  $Y_a$  BHFAO vs  $Y_a$  BHTM.

Teste T-Student	p-valor
$Y_{real}$ vs $Y_a$ BHFAO	0,7860 <sup>ns</sup>
$Y_{real}$ vs $Y_a$ BHTM	0,8204 <sup>ns</sup>
$Y_a$ BHFAO vs $Y_a$ BHTM	0,9111 <sup>ns</sup>

BHFAO - Allen et al. (1998); BHTM - Thornthwaite e Mather (1955); <sup>ns</sup> não significativo.

#### 4. Conclusões

Utilizando-se da metodologia apresentada, foi possível calibrar o índice de colheita para a cultura da soja no estado do Paraná. Além disso, os testes de comparação de média indicam que, as produtividades atingíveis estimadas com os valores de  $Cc$  são estatisticamente iguais aos valores de produtividade real. Ou seja, pode-se utilizar os valores de  $Cc$  de cada método para estimar a produtividade real. O trabalho apresentou bons resultados e servirá como base para trabalhos futuros na estimativa de produtividade de soja para o estado.

## Agradecimentos

Agradecemos aos agricultores que forneceram dados de suas propriedades para realização deste trabalho, ao CNPq e à Capes pelo apoio financeiro e ao programa de pós-graduação PGEAGRI. Ao Laboratório de Estatística Aplicada (LEA) da UNIOESTE-Camus Cascavel, pela infraestrutura disponibilizada para a realização da pesquisa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI) pelo apoio.

## Referências Bibliográficas

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - Irrigation and drainage paper FAO-56**. Rome: FAO, Vol. 1, 1998, 300 p.
- Baruth, B., Royer, A., & Genovese, G. (2006). Remote Sensing Support to Crop Yield Forecast and Area Estimates. **The International Archives Of The Photogrammetry, Remote Sensing And Spatial Information Sciences** (p. 155).
- Becker, W. R. **Estimativa de datas do ciclo da cultura da soja, no estado do Paraná, por meio de imagens MODIS**. 2013, 57 p. Trabalho de Conclusão de Curso - UNIOESTE, Cascavel, 2013.
- Bolton, D. K., & Friedl, M. a. Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 173, p. 74–84. doi:10.1016/j.agrformet.2013.01.007, 2013
- CONAB. (2013). **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, nono levantamento, junho 2013** / Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília : Conab, 2013, 31 p.
- Embrapa. (2011). **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada** / Humberto Gonçalves dos Santos ... [et al.]. — Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2011. 67 p. - (Documentos / Embrapa Solos, ISSN 1517-2627 ; 130)
- Grzegozewski, D. M.; Becker, W.; Johann, J. A.; Souza, C. H. W.; Uribe-Opazo, M. A.; Mercante, E. Uso de imagens de satélite para detecção de datas de semeadura, pico vegetativo e colheita das culturas do milho e soja na região Oeste do Paraná – Safra 2011/2012. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 2013, Foz do Iguaçu - Brasil. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 abril 2013, INPE, p. 1610-1617. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0951.pdf>>. Acesso em 10 de junho de 2013.
- Kemanian, A. R., Stöckle, C. O., Huggins, D. R., & Viegas, L. M.. A simple method to estimate harvest index in grain crops. **Field Crops Research**, 103(3), p. 208–216. doi:10.1016/j.fcr.2007.06.007, 2007
- Tao, F., Yokozawa, M., & Zhang, Z.. Remote sensing of crop production in China by production efficiency models : models comparisons , estimates and uncertainties. **Ecological Modelling**, 183, p. 385–396. doi:10.1016/j.ecolmodel.2004.08.023, 2005.
- Thornthwaite, C.W.; Mather, J.R. The water budget and its use in irrigation. In: **The Yearbook of Agriculture - Water**. Washington, D.C., Department of Agriculture, p.346-358, 1955.