

# ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO SWAP/WOFOST NA SIMULAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE MATÉRIA SECA DA CANA-DE-AÇÚCAR

FÁBIO VALE SCARPARE<sup>1</sup>, QUIRIJN DE JONG VAN LIER<sup>2</sup> ALEXANDRE HUGO  
CEZAR BARROS<sup>3</sup> SIMONE TONI RUIZ CORRÊA<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Eng. Agrônomo Pós-Graduando PPG Engenharia de Sistemas Agrícolas - ESALQ/USP, Av. Pádua Dias, 11- CP.9 - Piracicaba/SP-CEP 13418-900, Fone: 3429-4123, E-mail: [fvsarpa@esalq.usp.br](mailto:fvsarpa@esalq.usp.br)

<sup>2</sup> Professor Associado do Departamento de Engenharia de Biosistemas - ESALQ/USP.

<sup>3</sup> Pesquisador, Embrapa Solos, Rua Antonio Falcão, 402 – Boa Viagem – Recife/PE – CEP <sup>3</sup> 51020-240

<sup>4</sup> Pós-Graduando PPG Fitotecnia - ESALQ/USP

Apresentado no XVII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 18 a 21 de Julho de 2011 – SESC Centro de Turismo de Guarapari, Guarapari - ES.

**RESUMO:** A análise de sensibilidade é fundamental para a construção, compreensão e utilização de modelos matemáticos complexos em aplicações agroambiental, pois ajuda a identificar quais parâmetros de entrada são responsáveis por grandes mudanças em suas saídas. O objetivo desse trabalho foi classificar a sensibilidade relativa de alguns parâmetros de entrada do modelo *SWAP/WOFOST* procurando entender seu efeito na estimativa da produtividade de massa seca final da parte aérea da cultura da cana-de-açúcar. Foi utilizada a ferramenta *SENSAN* do programa *PEST* alterando o valor de uma única variável em +1 e -1% mantendo as demais inalteradas. A variação do índice de sensibilidade relativa em função da variação do parâmetro do modelo para dados de saída da massa seca da parte aérea no fim do ciclo foi representada graficamente. Os resultados mostraram que os parâmetros de assimilação de CO<sub>2</sub> exercem dominância para a variável de saída em relação a outros grupos de parâmetros testado sendo o parâmetro eficiência do uso da luz, *EFF*, o de maior sensibilidade relativa.

**PALAVRAS-CHAVE:** modelo de crescimento, produção, modelagem

## SENSITIVITY ANALYSIS OF SWAP/WOFOST MODEL FOR SUGARCANE ABOVE GROUND DRY MATTER SIMULATION

**ABSTRACT:** Sensitivity analysis is fundamental to build, to understand and to use complex mathematical models in agroenvironmental applications. It also helps to identify which input parameters are responsible for great changes in models outputs. This study aimed a sensitivity analysis for some input parameters of *SWAP/WOFOST* model in order to understand their effect on predicted crop yield (final above ground dry matter) for a sugarcane crop. The *SENSAN* tool from *PEST* software was used changing the value of a single parameter at +1 and -1% while leaving the others unchanged. The parameter sensitivity as a function of the parameter variation for above ground dry matter at the end of the cycle was plotted. The results showed that the group of CO<sub>2</sub> assimilation parameters exerts dominance over other groups tested being the light use efficiency parameter, *EFF*, the most sensitive one.

**KEYWORDS:** growth model, yield, modeling

**Introdução:** A análise de sensibilidade é uma técnica utilizada em estudos de modelagem visando identificar quais são os parâmetros mais relevantes, e conseqüentemente, qual deles são razoáveis a concentração de esforços durante o processo de parametrização e calibração (Confalonieri, 2010). Assim, a análise de sensibilidade calcula o quanto as saídas de um modelo dependem de seus dados de entrada e é uma etapa importante da avaliação do modelo

para tratar da incerteza de parâmetros, revelando indiretamente a confiabilidade das estimativas do modelo (Martorana e Bellocchi, 1999). O conhecimento da incerteza sobre o modelo é essencial para a modelagem de cultura, pois fornece informações cruciais para compreensão real de seu comportamento para fins de parametrização (Confalonieri et al., 2006). Estudos de análise de sensibilidade para o modelo *WOFOST* (Confalonieri et al., 2006 e Confalonieri, 2010), para o modelo *SWAP* (Singh et al., 2010) utilizado separadamente e para *SWAP/WOFOST* (Bessembinder et al., 2003) utilizado em conjunto é relatado na literatura científica. Este trabalho teve como objetivo classificar a sensibilidade relativa de alguns parâmetros de entrada do modelo *SWAP/WOFOST* procurando entender seu efeito na estimativa da produtividade de massa seca final da parte aérea da cultura da cana-de-açúcar.

**Material e Métodos:** O modelo agrohidrológico *SWAP* (Soil Water Atmosphere and Plant) utiliza mecanismos físicos associados aos processos de fluxo de água, fluxo de calor e transporte de solutos no solo (VAN DAM et al., 2008). O modelo *WOFOST* (WORld FOod STudies) simula o crescimento de uma cultura baseada em processos como a fotossíntese e a respiração e como esses sofrem influência do ambiente (VAN KEULEN e WOLF, 1986; SPITTERS et al., 1989). A utilização conjugada desses modelos tem a principal vantagem de melhor quantificar o efeito do estresse hídrico na produção de massa seca da parte aérea. As análises de sensibilidades foram realizadas pela ferramenta *SENSAN* (SENSitivity ANalysis) do programa *PEST* alterando o valor de uma única variável mantendo as demais inalteradas. *PEST* (Parameter ESTimation) é um código de calibração automático que tem a potencialidade de ajustar os parâmetros de determinado modelo de forma que os resultados gerados por este se aproximem o melhor possível dos valores reais do sistema, permitindo assim calibrar o modelo (DOHERTHY et al., 1995). Dessa forma foi possível representar graficamente a variação do índice de sensibilidade relativa em função da variação do parâmetro do modelo *SWAP/WOFOST* para dados de saída, massa seca da parte aérea no fim do ciclo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ). O índice de sensibilidade relativa foi calculado a partir da sensibilidade absoluta (SALTELLI, 2002).

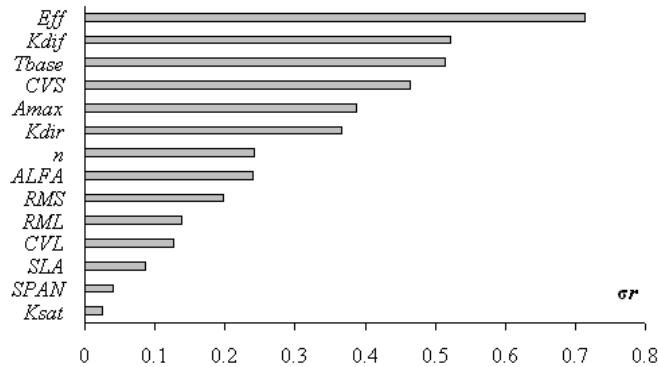
$$\sigma\left(\frac{y}{k}\right) = \frac{\delta y}{\delta k} \quad (1)$$

em que:  $\sigma(y/k)$  é a sensibilidade absoluta,  $\delta y$  é a diferença entre dados da variável de saída do modelo e  $\delta k$  é a diferença entre as variações do parâmetro de entrada.

$$\sigma_r\left(\frac{y}{k}\right) = \sigma\left(\frac{y}{k}\right) \frac{k}{y} \quad (2)$$

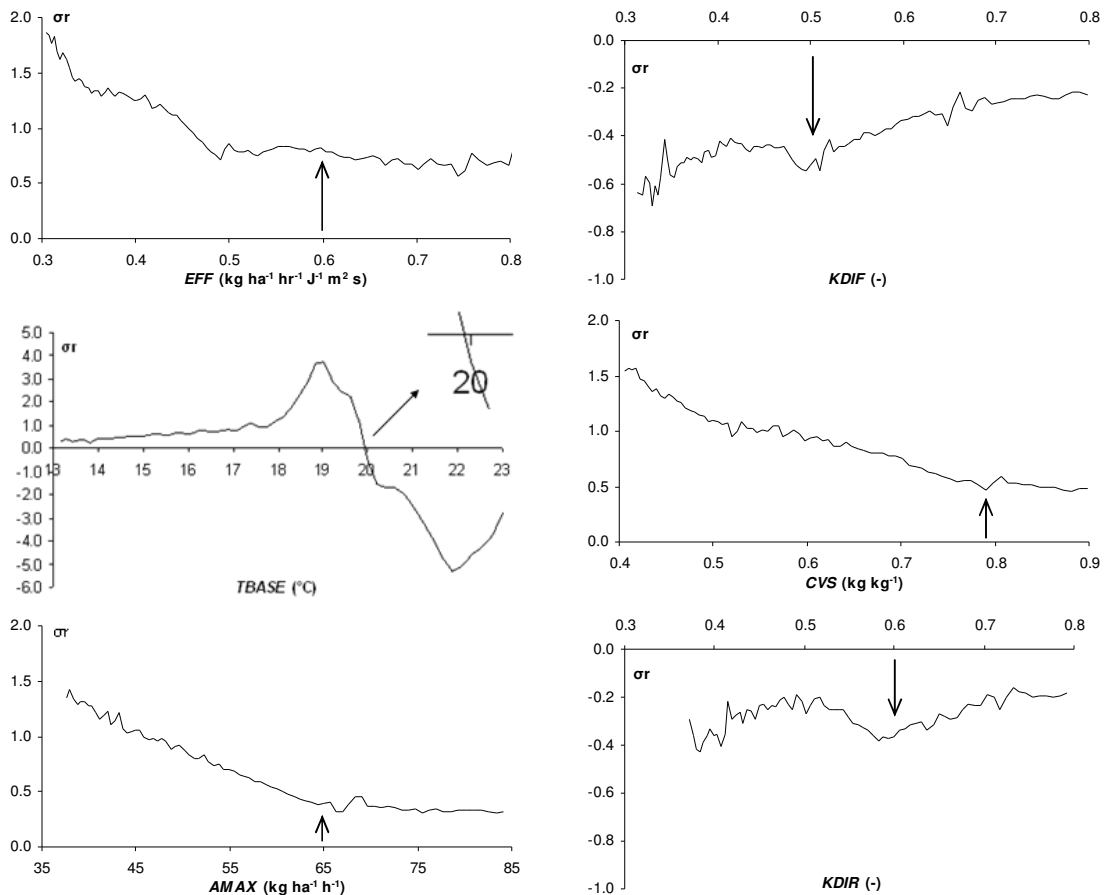
em que:  $\sigma_r(y/k)$  é a sensibilidade relativa,  $\sigma(y/k)$  é a sensibilidade absoluta,  $k$  é o valor do parâmetro padrão e  $y$  é o valor de saída da variável padrão. Sendo assim, os parâmetros analisados sofreram variações individuais de -1% e +1%. A condição padrão escolhida foi a como sendo o ciclo da cana planta cultivar SP 81-3250 em Jaboticabal-SP (21°19'98''S, 48°19'03''W, 600 m) em Latossolo Vermelho distrófico típico, *LVD* (EMBRAPA, 1999), classificação climática *Cwa* (KÖPPEN e GEIGER, 1936). A parametrização do modelo *WOFOST* para a cana-de-açúcar usada foi baseada em van Heemst (1988). Foram escolhidos 14 parâmetros de entrada de 5 áreas diferentes: **Assimilação de CO<sub>2</sub>**: eficiência do uso da luz (*EFF*,  $\text{kg ha}^{-1} \text{h}^{-1} (\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1})^{-1}$ ), taxa máxima de assimilação de CO<sub>2</sub> (*AMAX*,  $\text{kg ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ ), coeficiente de extinção de luz direta (*KDIR*, -), e difusa (*KDIF*, -); **Desenvolvimento de área foliar**: tempo máximo de sobrevivência da folhas (*SPAN*, d), temperatura base para envelhecimento de folhas (*TBASE*, °C), área foliar específica (*SLA*,  $\text{ha kg}^{-1}$ ); **Eficiência em conversão de assimilados em biomassa** em folhas (*CVL*,  $\text{kg kg}^{-1}$ ) e colmos (*CVS*,  $\text{kg kg}^{-1}$ ); **Respiração de manutenção** de colmos (*RMS*,  $\text{kg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) e folhas (*RML*,  $\text{kg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ ) e **Parâmetros hidráulicos do solo**: condutividade hidráulica saturada (*Ksat*,  $\text{cm d}^{-1}$ ), parâmetros  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) e  $n$  (-) da curva de retenção de água no solo (VAN GENUCHTEN, 1980).

**Resultados e Discussão:** O valor em módulo do índice de sensibilidade relativa pontual para cada parâmetro, ou seja, valor relativo que o incremento de 1 ou -1% exerce no acúmulo de massa seca final do ciclo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) está representado na FIGURA 1.



**FIGURA 1** – Índice de sensibilidade relativa, em módulo e ordem decrescente, dos parâmetros analisados em função da variação de massa seca final da parte aérea ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para o modelo SWAP/WOFOST parametrizado para cana-de-açúcar

Os resultados da variação do índice de sensibilidade relativa ( $\sigma_r$ ) em função da variação dos seis parâmetros mais sensíveis do modelo SWAP/WOFOST são apresentados na FIGURA 2.



**FIGURA 2** - Índice de sensibilidade relativa em função dos valores dos 6 parâmetros aos quais o modelo SWAP/WOFOST parametrizado para cana-de-açúcar é mais sensível.

Dos 6 parâmetros analisados aos quais o modelo é mais sensível 4 fazem parte de parâmetros de assimilação de CO<sub>2</sub>, um do desenvolvimento de área foliar e um da eficiência em conversão de assimilados em biomassa (FIGURA 1). Canfalonieri et al. (2006) afirmam que os parâmetros que compõe modelos complexos de crescimento de plantas, como o *WOFOST* estão organizados de forma hierárquica, ou seja, existe uma dominância de um grupo de parâmetros em relação a outros. Sendo assim constatado nesse estudo, que o grupo de parâmetros ligados diretamente a assimilação de CO<sub>2</sub> atuam no topo da hierarquia para a produção da massa seca final da parte aérea o que mostra ser coerente. Conseqüentemente sua determinação, por meio da calibragem ou medidas de campo, deve ser muito bem realizada e fundamentada. Canfalonieri et al. (2006) e Canfalonieri (2010) realizaram estudo de sensibilidade pelo método de Morris (MORRIS, 1991) determinado *AMAX*, *CVO* (parâmetro não estudado nesse trabalho), *CVS* e *TBASE* como os parâmetros de maior sensibilidade ao modelo *WOFOST* para incremento de massa seca da parte aérea da cultura do arroz. Bessembinder et al. (2003) realizaram análise de sensibilidade do modelo *SWAP/WOFOST* para as culturas de trigo, arroz e algodão na região de Sirsa, Índia relatando *EFF*, *AMAX* e *SLA* como os parâmetros mais sensíveis para o incremento do massa seca da parte aérea. Pela parametrização do *SWAP/WOFOST* para a cana-de-açúcar realizada nesse estudo, *EFF* foi o que apresentou maior sensibilidade relativa (FIGURA 2). Esse resultado era esperado devido ao fato de que *EFF* corresponde à inclinação da curva de assimilação máxima de CO<sub>2</sub> (*AMAX*), portanto pequenas variações nesse parâmetro resultam em variações diretas e significativas na massa seca final da parte aérea. Ainda, para *EFF* observa-se na FIGURA 2 que a variação da sensibilidade relativa em função da variação desse parâmetro atinge valores superiores para faixa de *EFF* entre 0,3 até aproximadamente 0,5. Os coeficientes de extinção, *KDIF* e *KDIR* também apresentam sensibilidade relativa elevada para a variação do teor de massa seca final da parte aérea (FIGURA 1), pois afetam de forma indireta na quantidade de radiação solar que atinge o interior do dossel da planta. A variação da sensibilidade relativa em função da variação dos parâmetros é maior para *KDIF* até aproximadamente 0,6 quando as sensibilidades relativas desses dois parâmetros tornam-se praticamente iguais (FIGURA 2). Dos parâmetros relacionados com o desenvolvimento da área foliar analisados, *TBASE* foi o que apresentou maior sensibilidade relativa, estando *SLA* e *SPAN* pouco representativo. *TBASE* parametrizado no valor de 20°C é o que proporciona maior incremento de massa seca final da parte aérea. É interessante observar que a variação desse parâmetro em +1% ou -1% proporcionaria sensibilidade relativa de 1,08954 e -1,53413, superior do que o parâmetro *EFF*, sendo então *TBASE* o parâmetro de maior sensibilidade do modelo para o teor de massa seca final da parte aérea. Esse parâmetro determina a temperatura limite responsável pelo tempo térmico para a manutenção de folhas no dossel da planta.

**Conclusões:** *SENSAN* mostrou ser uma ferramenta útil em analisar a variação da sensibilidade relativa dos parâmetros estudados do modelo *SWAP/WOFOST*. Tendo em vista a parametrização realizada no modelo *WOFOST* pode-se concluir que os parâmetros pertencentes ao grupo de assimilação de CO<sub>2</sub> apresentam alta sensibilidade relativa para a variável massa seca final da parte aérea sendo o parâmetro *EFF* o mais sensível entre os estudados.

### **Referências Bibliográficas:**

BESSEMBINDER, J.J.E.; DHINDWAL, A.S.; LEFFELAAR, P.A.; PONSIOEN, T.; SINGH, S. Analysis of crop growth, in Water Productivity of Irrigated Crops in Sirsa District, India: Integration of remote sensing, crop and soil models and geographical information systems, Wageningen University, Wageningen. p. 59-82, 2003.

CONFALONIERI, R.; ACUTIS, M.; BELLOCCHI, G. et al. Exploratory sensitivity analysis of cropsyst, warm and WOFOST: a case-study with rice biomass simulations. **Italian Journal of Agrometeorology**, v. 3, p. 17 – 25, 2006.

CONFALONIERI, R. Monte Carlo based sensitivity analysis of two crop simulators and considerations on model balance. **European Journal of Agronomy**, v. 33, p. 89 – 93 2010.

DOHERTY, J.; BREBBER, L.; WHYTE, P. PEST. Model independent parameter estimation. Australian Centre for Tropical Freshwater Research, James Cooke University, Townsville, Australia, p. 140, 1995.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412 p.

KÖPPEN WP, GEIGER R. Das geographische System der Klima. In Köppen WP, Geiger R Handbuch der Klimatologie. Borntrager, Berlin, 1936.

MARTORANA, F.; BELLOCCHI, G. A review of methodologies to evaluate agroecosystem simulation models. **Italian Journal of Agronomy**, v. 3, p. 19-39, 1999.

MORRIS, M. D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. **Technometrics**, v. 33, p. 161-174, 1991.

SALTELLI, A. Sensitivity analysis for importance assessment. **Risk Analysis**, New York, v. 22, n. 3, p. 579-590, 2002.

SINGH, K.U.; REN, L.; KANG, S. Simulation of soil water in space and time using an agro-hydrological model and remote sensing techniques. **Agricultural Water Management**, v. 97, p. 1210 – 1220, 2010.

VAN DAM, J.C.; GROENENDIJK, P.; HENDRIKS, R.F.A.; KROES, J.G. Advances of Modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. **Vadose Zone Journal**, v. 7, p. 640 – 653, 2008.

VAN HEEMST, H.D.J. Plant data values required for simple and universal simulation models: review and bibliography. Simulation reports CABO-TT. 1988.

VAN KEULEN, H.; WOLF, J. Modelling of agricultural production: weather, soil and crops. Simulation Monographs. Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp. 479. 1986.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

SPITTERS, C.J.T.; VAN KEULEN H.; VAN KRAALINGEN, D.W.G. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. In: R. Rabbinge, S.A. Ward and H.H. van Laar (Eds.) Simulation and systems management in crop protection. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, The Netherlands. p. 147-181, 1989.