

## MODELOS PARA A ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA APLICADOS À CULTURA DO MILHO

**Glaucio Luciano Araujo<sup>1</sup>, Everardo Chartuni Mantovani<sup>2</sup>, Gustavo Haddad Souza Vieira<sup>3</sup>, Monalisa Soares Costa<sup>4</sup>.**

<sup>1</sup> Engenheiro Agrônomo, Mestre em Engenharia Agrícola, Doutorando em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, Professor da Faculdade de Ciências Gerenciais de Manhuaçu.

<sup>2</sup> Engenheiro Agrícola, Mestre em Engenharia Agrícola, Doutor em Agronomia Manejo da Irrigação pela Universidad de Córdoba-Espanha, Professor Titular do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

<sup>3</sup> Engenheiro Agrônomo, Mestre em Engenharia Agrícola, Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa, Professor do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, campus de Santa Teresa.

<sup>4</sup> Engenheira Agrônoma, Mestranda em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa.

### RESUMO

O milho (*Zea mays* L.) é uma das mais importantes culturas cultivadas no Brasil, se espalhado por todos os estados brasileiros, no panorama mundial se trata de uma cultura cultivada em todos os continentes, sendo a base alimentar de muitas etnias. A estimativa de produtividade das culturas, antes da colheita é de suma importância para a agricultura, sendo que estas estimativas podem ser feitas por meio de modelos. Um modelo pode ser definido como uma equação ou um conjunto de equações que representam um processo. Geralmente, os modelos são classificados como empíricos ou mecanísticos. Os modelos mecanísticos requerem que os processos simulados descrevam o sistema em termos dos mecanismos físicos, químicos e biológicos. Já os modelos empíricos consistem em analisar dados experimentais, realizando algumas análises dos mesmos e ajustando equações matemáticas que possam representar o comportamento dos dados observados. Neste trabalho é apresentada uma revisão sobre modelos aplicados na agricultura, e na cultura do milho, apresentando ao final um modelo para a estimativa da biomassa e produtividade na cultura do milho.

**Palavras-chave:** Milho; Satélites; Estimativa da biomassa; Produtividade.

### ABSTRACT

Corn (*Zea mays* L.) is one of the most important crops grown in Brazil, spread to all Brazilian states, on the world stage it is a culture grown on every continent, being the staple food of many ethnicities. The estimated crop yield before harvest is of paramount importance to agriculture, and these estimates can be made using models. A model can be defined as an equation or set of equations that represent a process. Generally, models are classified as empirical or mechanistic. The mechanistic models require that the simulated processes describe the system in terms of physical, chemical and biological mechanisms. As for the empirical models are to analyze experimental data, performing some analysis of them and adjusting mathematical equations that can represent the behavior of the observed data. This

paper presents a review of models used in agriculture, and in maize, with the end of a model to estimate biomass and productivity in maize.

**Keywords:** Corn; Satellites; Estimate of biomass; Productivity.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil se encontra entre os maiores produtores mundiais de milho, sendo superado, atualmente, pelos Estados Unidos da América, maiores produtores mundiais da cultura e pela China. De acordo com o relatório publicado, em setembro de 2014, pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), na última safra no Brasil, foram plantados 15.801 mil hectares com a cultura do milho, com estimativa de produtividade média de 5.057 kg ha<sup>-1</sup> e estimativa de produção de 79.905 mil toneladas no País (CONAB, 2014). O cultivo do milho é encontrado em todos os Estados brasileiros. Sendo que existe o contínuo aumento de tecnologia produtiva elevando cada vez mais a produtividade da cultura.

A estimativa de produtividade das culturas, antes da colheita é de suma importância para a agricultura. Avaliações precisas e confiáveis das safras trazem uma série de benefícios, permitindo aos agricultores e aos órgãos ligados ao setor o planejamento eficiente de suas atividades. Uma das formas de estimar a produtividade das culturas é por meio de modelos matemáticos, que podem ser empíricos ou modelos que possuem fundamentação física e biológica (ARAUJO, 2013).

A estimativa do rendimento da cultura permite saber se a safra suprirá a demanda nacional, também permite planejar o transporte da safra dentro do país ou de um país para outro de forma eficiente e permite a comercialização da safra antes mesmo da colheita (ARAUJO, 2013).

Um modelo muito conhecido e utilizado é o modelo que descreve o acúmulo de biomassa por meio do somatório ou acúmulo da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) multiplicado por um fator de eficiência de conversão da

radiação em biomassa. Este modelo foi proposto por Monteith (1972), este tem grande potencial, pois pode ser aplicado em conjunção com dados de sensoriamento remoto.

Um dos principais parâmetros do modelo de Monteith (1972) é o fator de eficiência do uso da radiação, que traduz a porção da energia luminosa que é metabolizada em biomassa. Para estimar com eficiência esse fator, o modelo de Monteith (1972), pode ser acoplado ao modelo proposto por Field et al. (1995) que promove a estimativa da eficiência do uso da radiação em função da eficiência máxima da cultura, da temperatura e de um fator dependente da umidade do solo, que pode ser substituído pela fração evaporativa.

A fração evaporativa, por sua vez, é estimada pela razão entre o fluxo de calor latente de evaporação pelo somatório do fluxo de calor sensível e do fluxo de calor latente de evaporação. Desta forma, a fração evaporativa pode ser determinada por meio do balanço de energia, que pode ser realizado, por exemplo, utilizando o algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land).

O algoritmo SEBAL, que utiliza técnicas de sensoriamento remoto, foi formulado por Bastiaanssen et al. (1998) e possibilita a estimativa do fluxo de calor latente (LE) por meio da utilização de imagens de satélites, como um resíduo da equação clássica do balanço de energia, permitindo a estimativa da evapotranspiração da cultura imageada. Ele é constituído, em sua grande parte, por parametrizações físicas bem estabelecidas e pouco complexas, sendo que do total de passos existentes, poucos são aqueles que envolvem parametrizações empíricas.

As técnicas de sensoriamento remoto vêm sendo empregadas visando à predição da produtividade agrícola (BASTIAANSSEN e ALI, 2003; SAMARASINGHE, 2003). Diversos

modelos têm sido desenvolvidos objetivando uma melhor estimativa da produção das culturas. Nesse contexto, o modelo de Monteith (1972) tem sido adotado por vários pesquisadores (FIELD et al., 1995; BASTIAANSEN e ALI, 2003; SAMARASINGHE, 2003; BRADFORD et al., 2005) que utilizaram como dados de entrada do modelo, informações obtidas de radiômetros de alta, média e baixa resolução espacial e temporal.

Neste trabalho o objetivo foi realizar uma revisão bibliográfica sobre a aplicação dos modelos de estimativa da produção de biomassa na cultura do milho. Revelando quais as principais limitações do método que utiliza o modelo de Monteith (1972), acoplado ao modelo de Field et al. (1995) e ao algoritmo SEBAL. Abordando como estas limitações podem afetar os resultados estimados e soluções para os problemas.

## **2. MODELOS APLICADOS A AGRICULTURA**

Um modelo pode ser definido como uma equação ou um conjunto de equações que representam um processo (REINOLDS, 1979). O desenvolvimento de modelos tem favorecido a simulação precisa de muitos processos sobre o solo e culturas, fornecendo informações para a análise da sustentabilidade dos recursos naturais, com o aumento da produtividade (BOWEN et al., 1993).

Geralmente, os modelos são classificados como empíricos ou mecanísticos. Os modelos mecanísticos requerem que os processos simulados descrevam o sistema em termos dos mecanismos físicos, químicos e biológicos. Já os modelos empíricos consistem em analisar dados experimentais realizando algumas análises dos mesmos e ajustando equações matemáticas que possam representar o comportamento dos dados observados (MONTEITH, 1996).

Os modelos mecanísticos, devido a sua concepção, podem ser utilizados para explorar uma gama extensiva de tratamentos em locais diferentes o que não seria possível com experimentação

de campo, devido ao custo e ao tempo requerido (MONTEITH, 1996).

Devido à complexidade do sistema agrícola, modelos com níveis organizacionais distintos são encontrados na literatura operando desde a escala de um país ou continente, passando obviamente pela escala regional, de bacia hidrográfica, lavoura, a escala de planta até a escala celular. A escala da planta, de modo geral, é o nível de maior interesse para o modelador agrícola, por associar as reações e inter-relações do nível de tecidos e órgãos à escala de planta, e extrapolando para escalas maiores (SCARPARE, 2011).

De acordo com Whisler et al. (1986), Boote et al. (1996); Suguitani, (2006), o uso dos modelos para sistemas agrícolas é uma ferramenta de pesquisa interdisciplinar que integra o conhecimento podendo sintetizar os dados de um ou mais experimentos além de auxiliar no melhoramento genético e aumento do rendimento potencial, simulando as características genéticas das plantas; permite, ainda, verificar o efeito da taxa fotossintética nas folhas; prever os rendimentos e eventuais quebras de safras; administrar a irrigação e a adubação; prever as respostas da cultura a diferentes espaçamentos e efeitos de mudanças climáticas na cultura; além de otimizar o planejamento de plantio e colheita; auxiliar pesquisadores e produtores no manejo cultura, bem como diminuir gastos com a experimentação.

Segundo Argenton (2006), qualquer que seja a escala ou objetivo da modelagem, os modelos utilizados como suporte para a tomada de decisões geralmente contêm complexidade correspondente ao seu nível de detalhamento. Modelos de longo prazo (anuais ou maiores), e em grandes dimensões (planejamento nacional de safra), possivelmente são baseados em dados empíricos, geralmente oriundos de regressão entre o rendimento da cultura e outros fatores, como precipitação pluvial ou capacidade de armazenamento de água no solo. Por outro lado, existem modelos baseados em dados provenientes de processos que ocorrem

no dossel das culturas, operando em base de dados diários, alimentados com rigor mecanicista.

Os modelos de produtividade associados aos modelos de balanço hídrico são comumente utilizados para estimar safras agrícolas. Muitos estudos foram feitos utilizando diferentes modelos, diferentes climas e várias culturas, incluindo avaliações de suas eficiências, como, por exemplo, os de Dourado Neto et al. (2004), Egli e Bruening (1992) Farias et al. (2005), Alencar (2014), entre outros. Basicamente os modelos de balanço hídrico relacionam as propriedades físico-hídricas do solo com os componentes de entrada e saída de água no solo (HILLEL, 1980).

O objetivo do balanço hídrico é de se conhecer a deficiência ou excedente hídrico que afetará uma região em determinado período (THORNTHWAITE; MATHER, 1955), constituindo-se em uma ferramenta muito útil para a recomendação de cultivos agrícolas em determinada região, bem como as épocas de semeadura com os menores riscos climáticos (ANDRADE JÚNIOR et al., 2007; ASSAD et al., 1997).

De acordo com Hartmann (1994), o modelo mais simples para o balanço de água no solo é o modelo de balde (bucket model). Neste modelo, assume-se que o solo tem uma capacidade fixa para armazenar água, a qual está disponível para a evapotranspiração. Assim, a taxa de variação de água no solo é determinada pela precipitação, pela evapotranspiração e pelo escoamento superficial de água. No entanto, existem diversos modelos para realizar o balanço de água no solo como o modelo de Thornthwaite e Mather (THORNTHWAITE e MATHER, 1955) e o modelo de balanço hídrico - MBH CPTEC/INPE (TOMASELLA e ROSSATO, 2006).

Segundo Baier (1979), modelos de produtividade agrícola procuram explicar, baseados em processos físicos e fisiológicos, o efeito de uma ou mais variáveis meteorológicas sobre a resposta das plantas.

Inúmeras vantagens podem ser obtidas com a utilização de modelos de

produtividade, considerando que estes devem reunir uma quantidade de informações que representem os processos da planta e interações da planta com o ambiente e, também, colaborem para a interpretação de informações ainda desconhecidas no campo atual (THORNELLY, 1976). Vários modelos de cultura vêm sendo utilizados por pesquisadores para testar a habilidade de simular eventos fenológicos, produção de biomassa e produtividade de grãos.

Características do solo e informações sobre as práticas de manejo de culturas durante o período de dados climatológicos ou meteorológicos disponíveis para determinado local são informações relevantes para uso em modelos para predição de produtividade agrícola. Segundo Hoozeboom (2000), a utilização de modelos com a finalidade de predição pode ter aplicações que considerem desde a semeadura até a colheita, auxiliando na tomada de decisão por produtores rurais e instituições governamentais para formulação de políticas agrícolas.

Com o advento das novas tecnologias de informação, principalmente os sistemas de informação geográfica (SIG), o desenvolvimento de tais modelos tornou-se mais fácil, aumentando a necessidade de torná-los disponíveis para a comunidade, pesquisadores, agricultores e governantes, para o auxílio na tomada de decisão e solução de situações às quais foram criados para prever.

A maioria dos modelos de predição de rendimento se baseia nas ideias pioneiras de De Witt (1958), citado por Pavan (2007), que primeiramente relacionou o rendimento de culturas à transpiração. Com o objetivo de aprimorar e melhor representar a realidade, outros autores vêm modificando as ideias pioneiras de De Wit e conseguindo melhores resultados, os quais podem ser vistos nos trabalhos de Baier (1973), Doorenbos e Pruitt (1975), Jensen (1968), Bastiansem e Ali (2003), Almeida (2013), Araujo (2013), Alencar (2014), entre outros.

O modelo de produtividade de Doorenbos e Kassam, (1979) que relaciona a perda de rendimento de culturas com o déficit hídrico é comumente utilizado para gerar estimativas de perda de rendimento de culturas. Dentre os trabalhos utilizando este modelo, pode-se citar Dourado Neto et al. (2004) que avaliaram a produtividade potencial e deplecionada de milho para o Rio Grande do Sul em função das condições climáticas e, a partir de adaptações realizadas no modelo verificaram os efeitos do clima (época e locais) na produtividade da cultura de milho de forma satisfatória.

Um sistema de previsão de safra da cultura da soja também foi avaliado por Assad et al. (2007), utilizando os princípios de Doorenbos e Kassam (1979). Estes autores encontraram bons ajustes ( $r^2=0,87$ ) incorporando ajustes empíricos para cada região do Brasil e considerando as diferenças quanto ao potencial produtivo das principais variedades. Os desvios mais expressivos foram observados para os Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Mato Grosso do Sul, Maranhão, Piauí e Bahia.

O modelo de Doorenbos e Kassam (1979) também foi utilizado para estimar a produtividade da cultura do café. Rosa et al. (2010), utilizando imagens do sensor MODIS e dados agrometeorológicos, para fornecer as variáveis de entrada para o modelo agrometeorológico espectral com base no modelo de Doorenbos e Kassam (1979), para a mesorregião geográfica sul/sudoeste do Estado de Minas Gerais nos anos agrícolas de 2003/2004 a 2007/2008, mostraram a eficácia do modelo para estimar a produtividade dos cafezais, espacializar a quebra de produtividade e prever 80% da produtividade final, antes do início da colheita.

Outros modelos são amplamente utilizados, como o SWAP (Soil Water Atmosphere Plant) (Van DAM, 2000), o qual é uma extensão do modelo agro hidrológico SWATR (Soil Water actual Transpiration Rate) (FEEDES et al., 1978). O SWAP, além de simular o crescimento e desenvolvimento de

culturas, simula o transporte de água, solutos e calor na zona não saturada, em interação com o desenvolvimento da vegetação, utilizando a equação de Reichards (1931), para simular movimentos verticais de água e as equações de Mualem-Van Genuchten para definir as propriedades hidráulicas do solo.

Outros modelos são muito utilizados, como os modelos CERES (Crop Environment Resource Synthesis) (JONES e KINIRY, 1986), enquanto que um dos modelos idealizados mais recente é o Aquacrop, utilizado por Stetuto et al. (2009), Raes et al. (2009) e Alencar (2014).

O AquaCrop é um modelo que considera o efeito da água no rendimento das culturas, ou seja, a água tem função principal no modelo, denominado “water-driven model”. O modelo utiliza a equação original de Doorenbos e Kassam (1979) como ponto de partida e se desenvolve a partir dela por meio do cálculo da biomassa, com base na quantidade de água transpirada (ALENCAR, 2014).

Mantendo o conceito original de uma relação direta entre o consumo de água pela planta e a produtividade da cultura, o modelo AquaCrop evoluiu a partir da abordagem de Doorenbos e Kassam (1979). No modelo, a evapotranspiração da cultura é separada em transpiração da cultura e evaporação da água do solo para evitar confundir o efeito do uso improdutivo do consumo de água pela evaporação. Sendo a evaporação especialmente importante quando a cobertura do solo é incompleta, assim a evaporação se torna o componente principal da evapotranspiração na fase inicial do ciclo da cultura.

No AquaCrop a produção final é expressa como função da biomassa produzida e do índice de colheita para distinguir entre os efeitos do estresse ambiental sobre a biomassa daqueles que ocorrem no índice de colheita. A escala de tempo utilizada no AquaCrop é diária, dessa forma o modelo pode representar melhor a dinâmica da água no solo, da evaporação, da transpiração da cultura e da temperatura do ar.

O índice de colheita representa a razão entre a produtividade obtida e a matéria seca total. Isso porque, em geral, apenas uma parte da matéria seca total é colhida. Esse valor para a cultura do milho varia de 0,40 a 0,5 (DOORENBOS; KASSAM, 1979).

Segundo Hsiao et al. (2009), o modelo AquaCrop parte da premissa de que os parâmetros são conservativos, ou seja, são aplicáveis a uma ampla gama de condições, e não são específicos para determinado cultivo, ressaltando que há certamente algumas diferenças entre cultivares.

Vários modelos já desenvolvem e acoplam ferramentas para simulações, no entanto, há de se preocupar com as especificidades de cada modelo, condições de contorno e objetivo para os quais foram criados. Cada modelo é uma ferramenta especializada na solução de determinado problema, assim, para a solução de novos problemas são necessários novos modelos (BERNARDON e CALGARO, 2007).

Como já discutido, a produtividade de determinada cultura pode ser estimada por meio de técnicas de modelagem, pela qual os modelos são definidos como a representação matemática de um sistema ou um processo. A simulação inclui os processos necessários para a operacionalização do modelo ou a solução do modelo visando a simular o que acontece no sistema (WIT, 1978). Quando o desempenho de um sistema é representado matematicamente por equações, temos um modelo matemático. Este vai definir quantitativamente hipóteses sobre o sistema real, permitindo deduzir suas consequências (DOURADO-NETO et al., 1998).

As vantagens da utilização de modelos matemáticos, segundo Pessoa et al. (1997), implicam crescente aumento no uso, proposição e validação dos modelos, sendo elas: baixo custo, velocidade, completa informação, criação e proposição de cenários ideais. Quanto às limitações, podem ser citados aspectos referentes à validação dos modelos e simuladores, à dificuldade de decisão, quando o problema possui mais de uma

solução, à confiabilidade e exatidão do modelo empregado, ao custo de obtenção dos dados, à variabilidade espacial dos dados, e à variabilidade temporal dos dados e sua qualidade.

### **3. MODELOS APLICADOS À CULTURA DO MILHO**

Martins (2012), com o objetivo de antever o colapso de safras agrícolas para as culturas do milho e sorgo na região de Araripina, Serra Talhada, PE, e Cruz das Almas, BA, trabalhou para gerar estimativas de produtividade agrícola por meio de balanço hídrico diário, contabilizando a precipitação a evapotranspiração e drenagem profunda, levando em consideração as propriedades físicas do solo e fazendo uso da equação de rendimento agrícola proposta por Doorenbos e Kassam (1979). Esse autor propôs ajustes da equação original de Doorenbos e Kassam (1979), inserindo-se um fator deficitário a fim de melhor representar as condições hídricas da região de trabalho.

Martins (2012), inicialmente, fez uma avaliação dos métodos de estimativa de produtividade potencial propostos pela FAO, o Método da Zona Agroecológica e o Método de Wageningen. Esse autor conclui que, apesar de não haver grandes diferenças entre os métodos de estimativa de produtividade potencial, o método de Wageningen apresentou melhores resultados na estimativa de produtividade real.

O modelo, modificado por Martins (2012), apresentou uma estimativa de produtividade agrícola melhor que o modelo original em todas as análises individuais e para a análise conjunta, demonstrando a importância do fator deficitário. Ressalta-se que a análise conjunta dos resultados apresentou as melhores estimativas, o que sugere que o modelo possa também gerar estimativas satisfatórias para toda a região Nordeste.

É importante ressaltar que neste trabalho, o modelo original proposto por Doorenbos e Kassam (1979) foi comparado a um modelo modificado que inclui um fator que relaciona a inibição à

produção afetada por um déficit hídrico acentuado, denominado fator deficitário. A inclusão deste fator tende a melhorar o desempenho do modelo multiplicativo de Doorenbos e Kassam (1979), visto que períodos com deficiência acentuada de chuva inibem o desenvolvimento da planta, como períodos com excedente hídrico também inibem.

Andrioli e Sentelhas (2009), também utilizando o modelo de Doorenbos e Kassam (1979) para estimar rendimento de milho, encontraram coeficiente de Willmont (d) igual a 0,82, apresentando um desempenho muito bom. Vale salientar que estes autores utilizaram uma série significativamente maior de dados, contabilizando 244 experimentos, o que melhora de forma significativa os resultados.

Affholder et al. (1997), trabalhando com o modelo SARRA-Br (Sistema de Análise Regional do Risco Agroclimático-Brasil) derivado modelo SARRA proposto por Forest e Clopes (1994), na região do serrado brasileiro, mais precisamente no município de Silvânia-GO, obtiveram boas estimativas da produtividade potencial do milho. O modelo considera a transpiração como o componente de maior importância na determinação do rendimento potencial, e é composto de um módulo de balanço hídrico e de uma função empírica simplificada relacionando os termos do balanço hídrico com a produção.

A produção potencial pode ser definida como a que é obtida considerando-se os fatores do meio físico sobre os quais o agricultor não tem possibilidade de ação, principalmente os relacionados ao clima. Os outros fatores determinantes (fertilidade do solo, material genético etc.) são fixados em níveis não limitantes. Em geral, somente alguns fatores climáticos são levados em consideração no cálculo da produção potencial, principalmente em função de sua variabilidade na região específica que está sendo estudada.

Affholder et al. (1997) conclui que o modelo apresenta elevado potencial de previsão para a produção potencial do milho, sendo adequado ao zoneamento da produção do milho em escala regional. O

modelo proposto simula corretamente o enchimento da reserva de água do solo no início do ciclo de crescimento, em situações em que o escoamento superficial é nulo ou desprezível. Independentemente da ocorrência de escoamento superficial, a evapotranspiração real da cultura é estimada de forma satisfatória.

Os elementos climáticos afetam de várias formas o desenvolvimento vegetal. Modelos de simulação têm sido desenvolvidos para caracterizar as interações clima planta, com aplicações práticas em estudos e planejamento relacionados a épocas de semeadura e de colheita, previsão de safra, entre outros (KLOSOWSKI, 2008).

Assis et al. (2006), com o objetivo de avaliar uma metodologia para estimar a produtividade potencial da cultura do milho de acordo com valores médios diários de temperatura do ar e radiação solar, utilizando procedimentos estocásticos, promoveu um experimento em Piracicaba (Esalq/USP). Esses pesquisadores utilizaram valores registrados da temperatura média diária do ar durante 86 anos e da radiação solar global diária durante 25 anos. No experimento, as produtividades potenciais foram simuladas 1.000 vezes, em cada data de semeadura considerada (15/10 – época normal; 15/2 – safrinha; e 15/8 – safra de inverno). Os autores concluem que a metodologia de estimação permitiu definir a ordem de grandeza da produtividade potencial do milho em determinada localidade, com base nos dados de temperatura e radiação solar. O procedimento estocástico proposto permite associar a produtividade potencial de milho a determinada probabilidade.

Hodges et al. (1987) testaram a capacidade do modelo CERES-Maize para estimar flutuações anuais na produção de milho, para o cinturão do milho (Cornbelt) nos Estados Unidos da América (EUA), entre os anos de 1982-1985. O modelo foi executado para 51 localidades em 14 estados do Cornbelt, que responde por 85% da produção de milho dos EUA. O modelo foi calibrado para a região por derivar coeficientes de

variedades para cada estação com base no crescimento mínimo. Para 1982 (ano de calibração), 1983, 1984, e 1985, as estimativas de produção do modelo foram de 92, 97, 98 e 101%, respectivamente, comparadas as estimativas do USDA, órgão oficial pertencente ao governo dos EUA. Esses pesquisadores concluem que o modelo pode ser usado para a estimativa da produção em grandes áreas, mas necessitando de calibrações regionais mínimas. Também concluem que o modelo tem o potencial para estimativas em outras partes do mundo onde dados de temperaturas mínimas e máximas diárias, precipitação e radiação solar estão disponíveis.

Liu et al. (1989), fazendo uso do modelo CERES-Maize para Sete Lags-MG, obteve boas estimativas de produtividade para um híbrido de milho. Carberry et al. (1989) também obteve boas estimativas em Katherine, na Austrália.

#### **4. MODELO MULTESPECTRAL PARA A ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA NO MILHO**

O modelo proposto tem o objetivo de estimar a biomassa produzida pela cultura do milho, por meio de técnicas de sensoriamento remoto. No entanto, este se trata de um modelo composto, resultante do acoplamento de outros modelos, sendo o principal deles, um modelo que estima a biomassa produzida pelas culturas, em função da radiação absorvida pelas plantas. Esse modelo foi proposto por Monteith (1972), o modelo de Monteith é dependente de um fator que expressa a eficiência de conversão da energia luminosa em biomassa. Esse fator será estimado pelo modelo de Field et al. (1995), sendo este dependente da fração evaporativa. Por sua vez, a fração evaporativa será determinada por meio do algoritmo SEBAL (BASTIAANSEN et al., 1998), composto por uma série de equações de caráter físico-biológico.

A Figura 1 ilustra o modelo proposto, demonstrando o emprego dos dados meteorológicos e imagens do satélite e também o acoplamento dos modelos.

Na Figura 1 os dados de entrada do modelo são os dados meteorológicos de superfície, registrado pelas estações meteorológicas instaladas a campo, e também as imagens de satélite capturadas pelos sensores OLI (Operational Land Imager) e TIRS (Thermal Infrared Sensor), a bordo do satélite Landsat 8, isso para cada uma das datas de imageamento.

Antes de utilizar as imagens no modelo, as mesmas devem passar por um processo de reescalonamento do número digital, em que os valores de cinza de cada imagem, 16 bits, são convertidos em valores de radiância no topo da atmosfera e posteriormente são convertidos em reflectância.

No algoritmo SEBAL, será realizado o balanço de energia, para tanto, primeiramente são estimados índices de vegetação como o NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) e o SAVI (Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo), que, juntamente com valores de temperatura da superfície provenientes do sensor TIRS, possibilitam calcular o saldo de radiação.

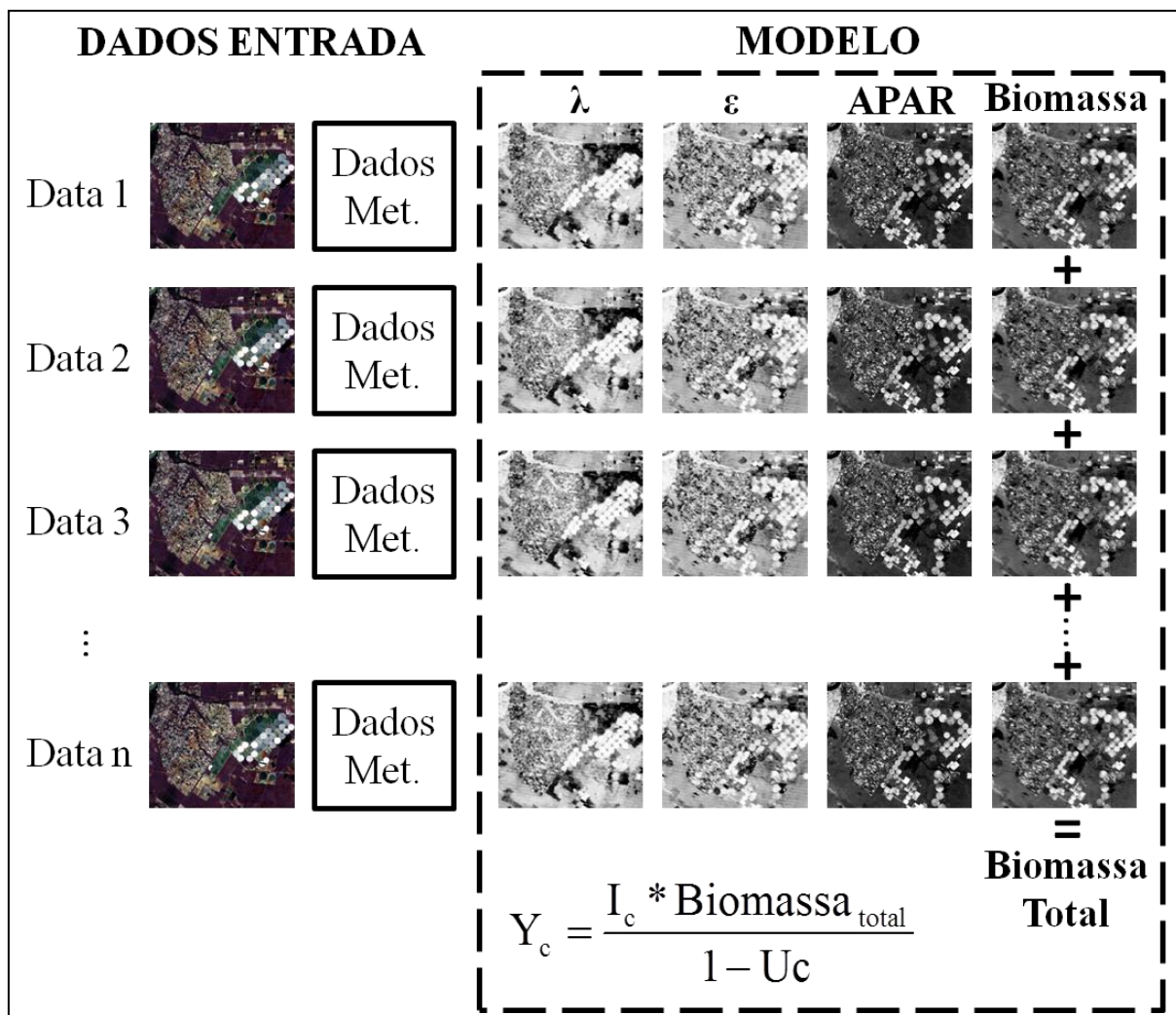
O saldo de radiação por sua vez, juntamente com o albedo da superfície, os índices de vegetação e a temperatura da superfície, possibilitam a estimativa do fluxo de calor no solo. Sendo que o fluxo de calor sensível deve ser estimado em um processo iterativo envolvendo os dados meteorológicos das estações e os índices de vegetação. O fluxo de calor latente é estimado como resíduo da equação do balanço de energia. Após estimados os fluxos de calor no solo, de calor sensível e de calor latente, deve ser realizado o cálculo da fração evaporativa.

A fração evaporativa descreve a partição do saldo de radiação em fluxo de calor latente e este processo de particionamento varia significativamente com as condições de umidade do solo (BRUTSAERT e SUGITA, 1992). A fração evaporativa é determinada pela razão entre o fluxo de calor latente e a soma entre o fluxo de calor latente e o fluxo de calor sensível, a fração evaporativa é aproximadamente constante durante o

período diurno (SHUTTLEWORTH et al., 1989).

A fração evaporativa será utilizada como entrada no modelo de Field et al. (1995) para possibilitar a estimativa do índice de eficiência do uso da luz. A eficiência do uso da luz é afetada

diretamente pela umidade do solo, a qual é de difícil quantificação devido a sua distinta variabilidade espacial e temporal, sendo este problema contornado com a utilização da fração evaporativa no lugar da umidade do solo.



**Figura 1.** Ilustração do modelo proposto. Dados Met.: Dados meteorológicos;  $\lambda$ : Fração evaporativa;  $\epsilon$ : Índice que expressa a eficiência do uso luz; APAR: Radiação absorvida pela cultura;  $Y_c$ : Produtividade potencial da cultura;  $I_c$ : Índice de colheita;  $U_c$ : Umidade de colheita;  $\text{Biomassa}_{\text{total}}$ : Biomassa total estimada da cultura.

A fração evaporativa é essencialmente controlada pela umidade do solo na zona radicular (BASTIAANSEN et al., 1997), possuindo correlação elevada e positiva. Medições de campo na cultura do trigo irrigado e lavouras de algodão no Paquistão confirmaram a relação entre a fração de evaporação do solo e a umidade existente no mesmo.

O modelo de Monteith (1972) utiliza os dados de radiação obtidos das estações meteorológicas de superfície para chegar aos valores de radiação fotossinteticamente ativa. A radiação fotossinteticamente ativa, combinada com os índices de vegetação, possibilita estimar a radiação fotossinteticamente ativa absorvida, que combinada com o índice de eficiência do uso da luz,

estimado pelo modelo de Field et al. (1995), possibilita o cálculo da biomassa total acumulada ( $\text{kg ha}^{-1}$ ; matéria seca) no intervalo de tempo de interesse.

Após aplicar o procedimento descrito, em cada uma das imagens do ciclo da cultura, será possível quantificar a biomassa seca total produzida pela mesma. A conversão de biomassa seca total acumulada para produtividade poderá ser realizada por meio da equação presente na Figura 1 (BASTIAANSSEN e ALI, 2003).

Depois de realizado o processo de estimativa da biomassa e produtividade potencial para todas as imagens, alguns pivôs serão tomados como base para calcular um índice chamado de índice de penalização.

O índice de penalização ( $I_p$ ) é um coeficiente multiplicativo utilizado para converter os valores de produtividade potencial em produtividade estimada, se tornado parte do modelo. O índice é dado pela razão entre a produtividade real de campo e a produtividade potencial (Equação 1), pesquisas prévias já realizadas indicam um valor de 0,552:

$$I_p = \frac{\text{Produtividade}}{Y_c} \quad (1)$$

Nesta equação, a produtividade real e a produtividade potencial são dadas em toneladas por hectare.

## 5. LIMITAÇÕES DO MODELO PROPOSTO

Por se tratar de um modelo multiespectral, dependente de imagens de satélites. O maior problema enfrentado, como em qualquer outro modelo alimentado por imagens orbitais, é a presença de nuvens nas cenas. Como relatam diversos autores, este é o grande impedimento para se obter imagens de satélite, durante o período da safra. Elas impedem que a energia refletida e/ou emitida pelos alvos da superfície terrestre chegue até o sensor a bordo do satélite.

A frequente cobertura de nuvens impede a obtenção de imagens livres de nuvens e impõe sérias limitações ao uso operacional das técnicas de sensoriamento remoto para estimativa de safras.

Para contornar este problema, existem alternativas relacionadas tanto com os sistemas sensores quanto com o sistema de coleta das informações.

Uma possível solução seria diminuir o período de revista dos satélites, no entanto, esta alternativa esbarra em princípios físicos que diminuem a resolução espacial. Uma alternativa a um período de revista menor, sem a diminuição da resolução espacial, seria a utilização de mais de um satélite, utilizando satélites com imagens compatíveis como os da família Landsat.

Outra limitação do modelo seria a utilização de parâmetros conservativos genéricos a todas as culturas, os resultados poderiam ser melhorados caso estes parâmetros fossem específicos à cultura do milho, no entanto, para alguns, são necessárias pesquisas muito específicas.

Como mencionado neste trabalho, alguns modelos realizam a penalização das safras agrícolas por meio da realização de balanços de água no solo, penalizando a produção das culturas em função do déficit hídrico sofrido.

O presente modelo não prevê a utilização dessa metodologia, que seria a mais indicada, no entanto, essa metodologia é demasiadamente dificultada no contexto do sensoriamento remoto. O presente modelo prevê uma penalização empírica em função da análise conjunta de dados estimados e valores mensurados a campo, criando um índice de penalização. Esse procedimento traz certo grau de empirismo ao modelo, no entanto, sem grandes prejuízos.

Visando a contornar esse problema, já está em estudo, uma forma de penalização alternativa, trabalhando com um índice normalizado, que se relaciona com o conteúdo de água na planta, o NDWI (Normalized Difference Water Index), proposto por Gao (1996). Dessa forma, a penalização seria realizada de

acordo com o conteúdo de água na planta, refletindo as influências do déficit hídrico.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFFHOLDER, F.; RODRIGUES, G. C.; ASSAD, E. D. Modelo agroclimático para avaliação do comportamento do milho na região dos cerrados. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.32, n.10, p.993-1002, 1997.

ALENCAR, L. P. de. **Parametrização e validação do modelo aquacrop para a cultura da cana-de-açúcar**. 2014. 117 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ALMEIDA, T. S. **Modelagem agrometeorológica-espectral para estimativa da produtividade de cafeeiros para áreas irrigadas do noroeste de minas gerais**. 2013. 63 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ANDRADE JÚNIOR, A. S.; CARDOSO, M. J.; BASTOS, E. A.; RIBEIRO, V. Q. Épocas de semeadura para a cultura do milho no cerrado do sul Maranhense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, n. 15, 2007, Aracaju. **Anais...** Aracaju: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2007.(CD-ROM).

ANDRIOLI, K. G.; SENTELHAS, P. C. Brazilian maize genotypes sensitivity to water deficit estimated through a simple crop yield model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.7, p.653-660. 2009.

ARAUJO, G. L. **Estimativa da produção em áreas irrigadas sob cultivo de cana-de-açúcar utilizando um modelo multiespectral**. 2013. 43 p. Disertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ARGENTON, P. E. **Influências das variáveis edafoclimáticas e de manejo no rendimento de cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) na região**

**de Piracicaba, São Paulo**. 2006. 109 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, B. A.; SANS, L. M. A.; FARIAS, J. R.; SILVA, S. C. Zoneamento agroclimático para grãos na região do Meio-Norte brasileiro. In: SIMPÓSIO SOBRE OS CERRADOS DO MEIO-NORTE, 1997, Teresina. **Anais...** Teresina: Embrapa, 1997.

ASSAD, E. D.; MARIN, F. R.; EVANGELISTA, S.R.; PILAU, F. G.; FARIAS, J. R. B.; PINTO, H. S.; ZULLO JÚNIOR, J. Sistema de previsão da safra de soja para o Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.5, p.615-625, 2007.

ASSIS, J. P. de; NETO, D. D.; REICHARDT, K.; MANFRON, P. A.; MARTIN, T. N.; BONNECARRÈRE, R. A. G. Dados climáticos simulados e produtividade potencial do milho. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.41, n.5, p.731-737, 2006.

BAIER, W. Crop-Weather Analysis Model: Review and Model Development. **J. Appl. Meteor.**, v.12, p. 937–947. 1973.

BAIER, W. Note on the Terminology of Crop-Weather Models. **Agric. Meteorol.** 20:137-145. 1979.

BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; DROOGERS, P.; de BRUIN, H. A. R.; MENENTI, M. Area-average estimates of evaporation, wetness indicators and top soil moisture during two golden days in EFEDA. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.87, p.119-137, 1997.

BASTIAANSEN, W. G.; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 94, p. 321-340, 2003.

- BASTIAANSEN, W. G.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSAG, A. A. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation. **Journal of Hidrology**, v. 212-213, p. 198-212, 1998.
- BERNADON, T.; CALGARO, M. Modelo de simulação de crescimento de plantas. **Ambiência**. Guarapuava, PR. v.3 n.2 p. 283-294. 2007.
- BOOTE, K. J., JONES, J.W, PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. **Agron. J.** 88:704–716. 1996.
- BOWEN, W. T. et al. Evaluation of the nitrogen submodel of Ceres-Maize following legume green manure incorporation. **Agron. J.**, Madison, v.85, n.1, p.153-159, 1993.
- BRADFORD, J. B.; HICKE, J. A.; LAUENROTH, W. K. The relative importance of light-use efficiency modifications from environmental conditions and cultivation for estimation of large-scale net primary productivity. **Remote Sensing of Environment**, v. 96, p. 246- 255, 2005.
- BRUTSAERT, W.; SUGITA, M. Applications of self preservation in the diurnal evolution of the surface energy budget to determine daily evaporation. **Journal of Geophysics Research**, v.97, p.377-382, 1992.
- CARBERRY, P. S.; MUCHOW, R. C.; McCOWN, R. L. Testing the CERES-Maize Simulation Model in a Semi-Arid Tropical Environment. **Field Crops Research**, v. 20, p. 297-315, 1989.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de Safra Brasileira Grãos: V.1 - SAFRA 2013/14 N.12 - Décimo Segundo Levantamento Setembro/2014**- Companhia Nacional de Abastecimento. - Brasília: Conab 2014. 151p.
- DOORENBOS, J., KASSAM, A. H. Yield response to water. **Irrig. And Drainage Paper no. 33**. FAO, Rome. 1979.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Las necesidades de água de los cultivos**. (Estudio FAO Riego y Drenaje, 24).Roma: FAO,193 p. 1977.
- DOURADO NETO, D. ; SPAROVEK, G. ; FIGUEIREDO JR., L. G. M. ; FANCELLI, A. L. ; MANFRON, P. A. ; MEDEIROS, S. L. P. . Modelo para estimação da produtividade de grãos de milho deplecionada com base no balanço hídrico no solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 359- 367, 2004.
- DOURADO-NETO, D.; TERUEL, D. A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O. O. S. Principles of crop modeling and simulation. I. Uses of mathematical models in agricultural science. **Scientia Agricola**, v.55, p.46-50, 1998.
- EGLI, D. B.; BRUENING, W. Planting date and soybean yield: evaluation of environmental effects with a crop simulation model: SOYGRO **Agricultural and Forest Meteorology** V. 62, p. 19-29, 1992.
- FARIAS, J. R. B.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.; MARIN, F. R. Modelagem para estimativa de perdas de rendimento de grãos de soja em função da disponibilidade hídrica. In SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO. 2005. Sete Lagoas- MG. **Anais...Sete Lagoas-MG**, 2005.
- FEDDES, R. A.; KOWALIK, P. J.; ZARADNY, H. Simulation os field water use and crop yield. **Simulation Monographs** . 189p. Wageningen : Pudoc. 1978.
- FIELD, C. B.; RANDERSON, J. T.; MALMSTROM, C. M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, p. 74-88, 1995.

- FOREST, F.; CLOPES, A. Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré. In: REYNIERS, F. N.; NETOYO, L. (Eds.). **Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale: Vers une gestion des flux hydriques par les systèmes de culture?** Paris: J. Libbey, 1994. p.3-15.
- GAO, B. NDWI - a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 257– 266, 1996.
- HARTMANN, D. L. **Global physical climatology**. New York: Academic Press, 1994. 411p.
- HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York: United Kingdom Edition, 1980. 385p.
- HODGES, T.; BOTNER, D.; SAKAMOTO, C.; HAYS HAUG, J. Using the CERES-Maize model to estimate production for the U.S. cornbelt. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 40, p. 293-303, 1987.
- HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, n.103, p.137-157. 2000.
- HSIAO, T. C., HENG, L.K., STEDUTO, P., ROJAS-LARA, B., RAES, D., FERERES, E. AquaCrop-the FAO crop model to simulate yield response to water III parameterization and testing for maize. **Agron. J.** v.101, pp. 448–459. 2009.
- JENSEN, M. E. Water consumption by agricultural plants. **Academic Press INC**. New York. 1968.
- JONES, P. N.; KINIRY, J. R. **Ceres-Maize: a simulation model of maize growth and development**. College Station: Texas A. M. University Press, 194p. 1986.
- KLOSOWSKI, E. Estimativa da produtividade de cultivares de soja por meio do modelo soygro para Londrina, estado do Paraná. **Revista UNIMAR**, Brasil, 19 jul. 2008.
- LIU, W. T. H.; BOTNER, D. M.; SAKAMOTO, C. M. Application of CERES-Maize model to yield prediction of a Brazilian maize hybrid. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 45, p. 299-312, 1989.
- MARTINS, M. A. **Estimativa de produtividade das culturas do milho e do sorgo a partir de modelos agrometeorológicos em algumas localidades da região nordeste do Brasil**. 2012. 97 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP.
- MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**, v.9, p.747-766, 1972.
- MONTEITH, J. L. The quest for balance in crop modelling. **Agron. Journal**. 88:695–697. 1996.
- PAVAN, W. **Técnicas de engenharia de software aplicadas à modelagem e simulação de doenças de plantas**. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2007.
- PESSOA, M. C. P. Y.; LUCHIARI JUNIOR, A.; FERNANDES, E. N.; LIMA, M. A. de. **Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para a análise de impactos ambientais das atividades agrícolas**. Jaguariúna: Embrapa-CNPMA, 1997. 83p. (Embrapa- CNPMA. Documentos, 8).
- RAES, D. et al. AquaCrop-The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: II. Main Algorithms and Software Description. **Agronomy Journal**. V. 101, Issue 3. 2009.

- REICHARDS, L. A. Capillary conductivity of liquid through porous media. **Physics**, New York, v.1, p. 318-333, 1931.
- REYNOLDS, J. F. Some misconceptions of mathematical modeling. **What's New Plant Physiology**, v.10, n.11, p.41-44, 1979.
- ROSA, V. G. C.; MOREIRA, M. A.; RUDOFF, B. F. T.; ADAMI, M. Estimativa da produtividade de café com base em um modelo agrometeorológico-espectral. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.45, n.12, p.1478-1488, dez. 2010.
- SAMARASINGHE, G. B. Growth and yields of Sri Lanka's major crops interpreted from public domain satellites. **Agricultural Water Management**, v. 58, p. 145-157, 2003.
- SCARPA, F. V. **Simulação do crescimento da cana-de-açúcar pelo modelo agrohidrológico SWAP/WOFOST**. 2011. 164 p. Tese (Doutorado em Física do ambiente agrícola) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- SHUTTLEWORTH, W. J.; GURNEY, R. J.; HSU, A. Y.; ORMSBY, J. P. **FIFE: the variation in energy partition at surface flux sites**. IAHS Publ. No. 186, 1989.
- STETUTO, P. et al. AquaCrop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. **Agronomy Journal**. v. 101, Issue 3. 2009.
- SUGUITANI, C. **Entendendo o crescimento e produção da cana de açúcar: avaliação do modelo Mosicas**. 2006. 60 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- THORNLEY, J. H. M. **Mathematical models in plant physiology: a quantitative approach to problems in plant crop physiology**. London: Academic Press. 318p 1976.
- THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. New Jersey: Laboratory of climatology, 104 p. 1955.(Publication in Climatology, 8).
- TOMASELLA, J.; ROSSATO, L. Balanço hídrico. **Tópicos em meio ambiente e ciências atmosféricas: utilização de recursos multimídia para o ensino médio e fundamental**. Cachoeira Paulista: Mamute Mídia, 2006. p. 9. ISBN 85-17-00024-2. (INPE-13140-PRE/8399). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1915/2005/11.08.13.25>>. Acesso em: 11/04/2012.
- VAN DAM, J. C. **Field-scale water flow and solute transport SWAP model concepts, parameter estimation and case studies**. (Doctoral Thesis). 2000. 179p. Wageningen University, Wageningen, 2000.
- WHISLER, F. D., B. ACOCK, D. N. BAKER, R. E. FYE, H. F. HODGES, J. R. LAMBERT, H. E. LEMMON, J. M. MCKINION, V. R. REDDY. Crop simulation models in agronomic systems. **Adv. Agron.** 40:141–208. 1986.
- WIT, C. T. de. **Simulation of assimilation, respiration, and transpiration of crops**. Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1978. 141p.