

## Modelos de simulação de agroecossistemas como ferramentas para avaliar sistemas agrícolas em regiões tropicais





*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Pesca e Aquicultura  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

## ***Documentos 35***

# **Modelos de simulação de agroecossistemas como ferramentas para avaliar sistemas agrícolas em regiões tropicais**

Embrapa Pesca e Aquicultura  
Palmas, TO  
2017

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Pesca e Aquicultura**

Av. NS 10, s/n, Loteamento Água Fria,  
Plano Diretor Norte, Palmas, TO  
Caixa Postal nº 90 , CEP 77008-900  
Fone: (63) 3229-7800/ 3229-7850  
www.embrapa.br  
www.embrapa.br/fale-conosco/sac/

**Unidade responsável pelo conteúdo**

Embrapa Pesca e Aquicultura

**Comitê de Publicações**

Presidente: *Eric Arthur Bastos Routledge*

Secretária-Executiva: *Marta Eichenberger Ummus*

Membros: *Alisson Moura Santos, Andrea Elena Pizarro Munoz, Hellen Christina G. de Almeida, Jefferson Christofolletti, Luciana Cristine Vasques Villela, Luciana Nakaghi Ganeco, Rodrigo Veras da Costa.*

**Unidade responsável pela edição**

*Embrapa Pesca e Aquicultura*

Coordenação editorial  
*Embrapa Pesca e Aquicultura*

Supervisão editorial  
*Embrapa Pesca e Aquicultura*

Normalização bibliográfica  
*Embrapa Pesca e Aquicultura*

Editoração eletrônica e  
tratamento das ilustrações  
*Jefferson Christofolletti*  
*Daniel Arrais de Carvalho*

Foto de capa  
*Flavia B. Fiorini*

**1ª edição**

Versão eletrônica (2017)

**Todos os direitos reservados**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Informação Tecnológica

---

Modelos de simulação de agroecossistemas como ferramentas para avaliar sistemas agrícolas em regiões tropicais / autores, Elisandra Solange Oliveira Bortolon, Leandro Bortolon e Ariovaldo Luchiar Junior. Palmas, TO: Embrapa Pesca e Aquicultura, 2017.

74 p. (Documentos / Embrapa Pesca e Aquicultura, ISSN 2318-1400 ; 35).

1. Modelagem de sistemas. 2. Simuladores. 3. Regiões de expansão agrícola. 4. Agropecuária. I. Bortolon, Elisandra Solange Oliveira. II. Bortolon, Leandro. III. Luchiar Junior, Ariovaldo. IV. Embrapa Pesca e Aquicultura. V. Série.

---

CDD 664.942

© Embrapa 2017

# **Autores**

**Elisandra Solange Oliveira Bortolon**

Engenheira Agrônoma, DSc, Pesquisador,  
Embrapa Pesca e Aquicultura, Palmas, TO.

**Leandro Bortolon**

Engenheiro Agrônomo, DSc, Pesquisador,  
Embrapa Pesca e Aquicultura, Palmas, TO.

**Ariovaldo Luchiari Júnior**

Engenheiro Agrônomo, DSc, Pesquisador,  
Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP.



# Apresentação

Os modelos de simulação trouxeram a abordagem de sistema para o setor agropecuário e novos entendimentos aos sistemas de produção agrícola ou agroecossistemas. O uso de modelos de simulação como ferramenta auxiliar no direcionamento de pesquisas, programas de suporte à tomada de decisão e de desenvolvimento de políticas públicas pode evitar que sejam desperdiçados tempo e recursos (financeiros e humanos) em perseguir metas inatingíveis na busca por alternativas de sistemas de produção sustentáveis, em especial em regiões tropicais e de expansão agrícola, potencializando o desenvolvimento regional e reduzindo os impactos negativos das atividades agropecuárias nas mudanças climáticas globais.

No Brasil, a região do MATOPIBA (formada pelas áreas de cerrado dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), abrange cerca de 73 milhões de hectares, é considerada a última grande fronteira agrícola tropical e encontra-se em franca expansão. Nesta região um dos grandes desafios para o desenvolvimento sustentável é justamente estimular o rápido desenvolvimento sem que ocorra a degradação ambiental, comumente causada pela remoção e queimadas da vegetação nativa (cerrado) e posterior utilização das áreas com pecuária extensiva e extrativista, que são dois dos principais fatores associados as emissões de gases de efeito estufa do país.

Neste contexto, a utilização de modelos de simulação de agroecossistemas adaptados às condições locais e regionais pode acelerar o processo de obtenção de resultados de pesquisa em regiões de fronteira agrícola, permitindo analisar o desempenho de diversos sistemas agropecuários frente aos cenários futuros de mudanças climáticas, incorporando diversas práticas de manejo de solo e de culturas e os avanços tecnológicos da agropecuária (a custo baixo), bem como extrapolar os resultados das pesquisas de campo em termos de tempo (cenários futuros) e espaço (diferentes locais), considerando ainda o impacto ambiental destes sistemas de produção. Assim, é possível identificar sistemas de produção agropecuária mais sustentáveis e incentivar a adoção dos mesmos em curto e médio prazos, a partir de estudos de campo direcionados.

Este manuscrito busca identificar e caracterizar modelos de simulação de agroecossistemas com potencial para serem utilizados na avaliação de sistemas de produção agropecuária, com ênfase em regiões tropicais e áreas de expansão agrícola, visando potencializar o desenvolvimento regional e reduzindo os impactos das atividades agropecuárias nas mudanças climáticas globais. Com isso, almeja contribuir para que cientistas e modeladores brasileiros sejam incentivados em continuar as ações de pesquisa buscando a calibração e validação de diferentes modelos de agroecossistemas para condições locais e regionais, e que os demais cientistas relacionados ao setor agrícola possam visualizar as oportunidades de integração das diversas áreas do conhecimento através da utilização da modelagem de sistemas, visto que esta pode ser uma ferramenta extremamente útil para auxiliar superação de desafios comuns.

*Eric Arthur Bastos Routledge*  
Chefe de Pesquisa e Desenvolvimento

# Sumário

<b>Modelos de simulação de agroecossistemas como ferramentas para avaliar sistemas agrícolas em regiões tropicais</b> .....	9
<b>Introdução</b> .....	9
<b>Modelos matemáticos e de simulação</b> .....	12
Conceitos.....	12
Classificação .....	13
<b>Etapas e procedimentos de modelagem</b> .....	15
Verificação .....	16
Calibração ou parametrização.....	17
Validação.....	17
Credibilidade .....	17
<b>Uso de modelos de simulação e o avanço no conhecimento científico na agropecuária</b> .....	18
<b>Principais limitações no uso de modelos de simulação de agroecossistemas</b> .....	19
<b>Modelos de simulação de agroecossistemas com potencial para avaliar sistemas agrícolas</b> .....	20

Modelos de simulação do crescimento de plantas.....	21
O modelo APSIM.....	21
O modelo DSSAT.....	22
Modelos de simulação de perdas de solo e água (erosão).....	25
O modelo SWAT.....	25
O modelo EPIC.....	27
O modelo APEX.....	32
Modelos de simulação da dinâmica da matéria orgânica do solo.....	34
O modelo CENTURY.....	34
O modelo RothC.....	37
Modelos de simulação da dinâmica de nutrientes.....	38
O modelo ANIMO.....	38
O modelo RZWQM.....	40
Modelos de simulação da emissão de gases de efeito estufa... 43	43
O modelo DAYCENT.....	43
<b>Exemplos de aplicação de modelos de simulação de agroecossistemas em regiões tropicais.....</b>	<b>46</b>
<b>Potencial de uso de modelos de simulação em regiões de expansão agrícola no Brasil, com ênfase na agricultura de baixa emissão de carbono.....</b>	<b>49</b>
<b>Considerações finais.....</b>	<b>52</b>
<b>Agradecimentos.....</b>	<b>52</b>
<b>Referências.....</b>	<b>53</b>

# Modelos de simulação de agroecossistemas como ferramentas para avaliar sistemas agrícolas em regiões tropicais

---

*Elisandra Solange Oliveira Bortolon*

*Leandro Bortolon*

*Ariovaldo Luchiar Junior*

## Introdução

Os desafios impostos pelas incertezas climáticas associados a previsão de crescimento da população mundial nas próximas décadas (9 bilhões de pessoas até 2050) tornam imprescindível o aumento na produção alimentos, mas este deverá ocorrer de forma racional e sustentável. (ROSENZWEIG et al., 2013). A agricultura de baixa emissão de carbono vem sendo apontada como uma importante estratégia de redução nas incertezas climáticas globais, e de garantia da sustentabilidade no setor agropecuário, devido ao seu potencial de mitigação dos impactos negativos causados pelo aumento emissões de gases de efeito estufa. O Brasil tem tido papel de destaque nesta área (ASSAD e MARTINS, 2015), e nesse sentido, a modelagem de *agroecossistemas* poderá desempenhar um papel fundamental na avaliação rápida e confiável dos impactos destas adaptações ou modificações nos sistemas de produção, desde que sejam consideradas as incertezas e as limitações intrínsecas a cada modelo em relação as suas estimativas.

Atualmente, ao redor do mundo, diversos modelos de simulação de agroecossistemas têm sido testados e utilizados para estimar o impacto das mudanças no clima e do uso e manejo de solo sobre o rendimento das culturas, dinâmica da matéria orgânica do solo (MOS) e de nutrientes, emissão de gases de efeito estufa (GEE), etc (ROSENZWEIG

et al., 2013). No entanto, tais estudos são mais abundantes para regiões de clima temperado, para as quais a maioria dos modelos foi desenvolvida, havendo carência de informações detalhadas sobre o potencial de uso dos diferentes modelos de simulação, suas limitações e incertezas, considerando a diversidade de sistemas produtivos encontrados em regiões tropicais e subtropicais.

Nos trópicos e subtrópicos, como é o caso do Brasil, modelos de agroecossistemas adaptados e validados para condições locais e regionais poderão ser importantes ferramentas para auxiliar no avanço e direcionamento de pesquisas, programas de suporte à tomada de decisão e de desenvolvimento de políticas públicas, especialmente em áreas de expansão agropecuária, onde o estímulo ao desenvolvimento regional, em geral, está associado à degradação ambiental pelo desmatamento acelerado. Assim, dada a urgência na obtenção/geração de resultados de pesquisa considerando cenários futuros de mudanças climáticas em tais condições, regiões de fronteira agrícola podem priorizar os estudos com modelagem como alternativa para amplificação e extrapolação dos resultados das pesquisas de campo em termos de tempo (cenários futuros) e espaço (diferentes locais). Nestas condições, também é recomendável a utilização de novas tecnologias como a modelagem (informática na agropecuária) associada à Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ampliando o alcance das pesquisas locais, atuando na fronteira do conhecimento científico.

Em regiões de expansão agropecuária, em geral os resultados experimentais são ainda limitados, especialmente em termos de avaliação de restrições e oportunidades para melhoria do uso dos recursos naturais, bem como da adaptação de materiais genéticos e produtividade das culturas. Assim, os modelos de simulação validados para as condições locais podem ser usados para simular cenários alternativos, considerando estratégias de manejo de solo e de culturas, para avaliar os riscos em médio e longo prazo, enquanto avaliações experimentais de estratégias condicionais e/ou alternativas não sejam possíveis.

Outro fator notadamente relevante e que, em geral, é um limitante nas regiões de expansão agropecuária brasileira, é a restrita rede observacional de parâmetros meteorológicos dada a deficiência de estações meteorológicas instaladas e em funcionamento nestas regiões, o que limita o entendimento das condições e das variações climáticas (micro)regionais. Isso além de aumentar os erros associados as previsões e análises climáticas, imprescindíveis para a tomada de decisão no contexto do agronegócio, também reduz a capacidade de extrapolação dos resultados dos modelos preditivos utilizados.

Modelos de simulação de agroecossistemas considerados neste estudo referem-se àqueles modelos capazes de simular/estimar as alterações ao longo do tempo (curto, médio e longo prazos) no solo (dinâmica de nutrientes, MOS, erosão, poluição, emissão de gases de efeito estufa, etc) e plantas (nativas ou cultivadas) que ocorrem em uma dada unidade de terra (parcela, gleba, microbacia ou região), em resposta às condições climáticas (especialmente precipitação, temperatura e radiação) e de manejo do solo e das culturas, possibilitando uma análise integrada dos componentes solo-água-plantas-atmosfera em diferentes sistemas de produção agropecuária.

Exemplos destes modelos são: ANIMO (Agricultural Nitrogen Model) (BERGHUIJS VAN DIJK et al, 1985; RIJTEMA e KROES, 1991); APEX (Agricultural Policy/Environmental EXtender) (WILLIAMS et al, 1995); APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) (McCOWN et al., 1994); CERES (CARBERRY et al.,1989); CENTURY (Soil Organic Matter Model) (METHEREL et al., 1994; PARTON et al., 1994); DAYCENT (DAYCENT Ecosystem Model) (PARTON et al.,1998; DEL GROSSO et al.,2001); DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) (TSUJI et al., 1994); EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) (WILLIAMS et al., 1989; WILLIAMS, 1990; WILLIAMS, 1995); ROTHM (Rothamsted Carbon Model) (JENKINSON et al, 1991; COLEMAN e JENKINSON, 1996); RZWQM (Root Zone Water Quality Model) (AHUJA et al., 1999a); SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (ARNOLD et al., 1998); entre outros.

Com base no exposto, o objetivo desta revisão foi identificar e caracterizar modelos de simulação de agroecossistemas com potencial para serem utilizados na avaliação de sistemas de produção agropecuária, com ênfase em regiões tropicais e áreas de expansão agrícola, visando potencializar o desenvolvimento regional e reduzindo os impactos das atividades agropecuárias nas mudanças climáticas globais.

## **Modelos matemáticos e de simulação**

### **Conceitos**

Embora não exista uma diferença clara entre modelos matemáticos e modelos de simulação, a princípio, modelos matemáticos são representações matemáticas de um fenômeno, e modelos de simulação ou simuladores são algoritmos que englobam um ou mais modelos matemáticos, que representam fenômenos mais complexos. Devido à sua maior complexidade modelos de simulação geralmente têm seus algoritmos transformados em programas de computador, visando aumentar a velocidade de cálculo. Tanto os modelos de simulação como matemáticos tem objetivos diversos, sendo utilizados para testar hipóteses e conceitos novos ou conhecidos, compreender problemas complexos, avaliar ou prever fenômenos observados ou dados experimentais, prever perspectivas de estudos e auxiliar no desenvolvimento de práticas adequadas de manejo (TANJI, 1982).

Segundo Addiscott (1993), um modelo é uma representação simplificada da realidade e, para Odum (1988), os modelos podem ser verbais ou gráficos (informais), mas para permitir previsões quantitativas com certo grau de confiabilidade, os modelos devem ser estatísticos e matemáticos (formais).

Modelos são úteis geralmente não porque eles reproduzem a realidade, mas por simplificá-la e, assim, permitir que os aspectos mais importantes sejam identificados, estudados, simulados e, se tudo

estiver bem, previstos com antecedência. Por exemplo, Greenland et al. (1992) definiram que não se podem fazer afirmações genéricas sobre as características da matéria orgânica (MO) em solos tropicais, devido à diversidade de solos e de fatores que afetam a sua dinâmica, recomendando-se, então, a utilização de modelos de simulação, pois consideram mais adequadamente os fatores que influenciam nessa dinâmica. No entanto, por causa do elemento de simplificação, nenhum modelo deve ser usado para fazer previsões fora do contexto em que foi desenvolvido ou além do alcance de valores de parâmetro a partir do qual foi validado (ADDISCOTT, 1993).

## **Classificação**

Existem diversas maneiras de se classificar os modelos matemáticos e de simulação (BANDINELLI, 2008).

Uma classificação dos modelos matemáticos e de simulação pode ser encontrada em Medeiros (2003). Neste caso, os modelos matemáticos e de simulação podem ser classificados quanto: a) ao tipo de equações que os constituem (lineares e não lineares); b) ao grau de explicação dos fenômenos que estimam ou descrevem (empíricos ou mecanistas); c) à forma com que tratam as mudanças ocorridas em relação ao tempo físico (dinâmicos ou estáticos); e d) ao tratamento estatístico de suas variáveis e dos seus parâmetros (estocásticos ou deterministas).

Já, segundo Steyaert (1993) os modelos podem ser classificados genericamente em três grupos: escala ou réplica, conceitual e matemático. Os modelos conceituais modelam processos através da construção de blocos diagramas que mostram o sistema principal, processos e inter-relações qualitativas entre os subsistemas.

Uma das classificações mais aceitas foi proposta por Addiscott (1993). Segundo este autor, os modelos de simulação podem ser classificados quanto ao grau de incertezas, quanto ao conceito e quanto ao uso principal, conforme segue:

## a) Quanto ao grau de incertezas:

- » Determinísticos - presumem que certo conjunto de eventos leva a um resultado único e definido;
- » Estocásticos - pressupõem que os resultados sejam incertos, estando estruturados para funcionar com essa incerteza;
- » Praticamente todos os sistemas naturais possuem incertezas intrínsecas, mas elas são ignoradas em um modelo determinístico, que pode somente simular uma resposta para um único conjunto de condições. Modelos estocásticos podem empiricamente descrever e prever mudanças sob a composição e abundância de espécies, por exemplo, apesar da complexidade do tema, reduzindo custos e trabalho por eximir-se de medidas de um grande número de fatores (BALZTER, 2000). Assim, as simulações são úteis dependendo da natureza e extensão da variabilidade que tenha sido ignorada.

## b) Quanto ao conceito:

- » Empíricos ou correlativos - modelos que descrevem as relações entre variáveis obtidas experimentalmente, sem compreender as estruturas físicas ou biológicas existentes entre essas variáveis;
- » Mecanísticos ou explanatórios - avaliam-se detalhadamente todas as variáveis que podem influir no sistema e suas interações e, a partir desse conhecimento, constroem-se as relações matemáticas que descrevem o sistema.
- » Funcionais - visam dar uma boa e geral descrição dos processos sem se aprofundar nos detalhes.

Embora a distinção entre modelos empíricos e mecanísticos seja útil, os modelos de simulação geralmente contêm uma mistura de empirismo e mecanicismo. Além disso, um modelo funcional provavelmente simplifica mais os processos que um modelo mecanísticos, mas isso usualmente significa que seus parâmetros são mais facilmente obtidos. E apesar da simplificação, modelos funcionais normalmente permitem

simulações que são, em princípio, tão boas como aquelas dos modelos mecanísticos.

c) Quanto ao uso principal:

» Para fins de pesquisa – seu uso principal é para pesquisa, para testar o atual nível de entendimento dos processos e identificar áreas que necessitam ser mais estudadas;

» Para suporte a decisões – seu uso principal é no auxílio para tomada de decisões de manejo e para facilitar o uso eficiente de recursos.

No entanto, alguns modelos de pesquisa podem, a partir de alguma simplificação, usualmente na forma em que os parâmetros são tratados, ser utilizados para tomada de decisões de manejo. Além disso, alguns modelos de suporte na tomada de decisão podem ajudar na pesquisa, especialmente na interpretação de resultados experimentais.

## **Etapas e procedimentos de modelagem**

Um modelo é constituído de pelo menos três elementos: variáveis, relacionamentos e processos. Ao se construir um modelo, dependendo do objetivo, pode-se dar ênfase a um ou outro destes elementos (LAMBIN, 1994).

Para Gomes e Varriale (2004), não é razoável esperar que exista um procedimento sistemático universal, para o desenvolvimento e construção de modelos. E propõe que em uma primeira etapa, a partir de uma teoria geral, seleciona-se e combina-se uma série de relações (um modelo específico) que, supõe-se, possa descrever um dado sistema. Esta etapa é realizada antes de qualquer experimento de campo. A etapa seguinte consiste em estabelecer uma forma de avaliar a qualidade, ou não, do modelo escolhido, para descrever o comportamento observado experimentalmente. Deste teste de

validade, decorre à busca do aperfeiçoamento do modelo, fazendo uso de uma coleção de dados experimentais (calibração do modelo, validação).

Em geral, na construção do modelo são adotados dois passos. A priori: conceituação, escolha do tipo de modelo e aspectos computacionais. A posteriori: calibração/verificação e validação.

Considerando que no presente estudo, onde será abordado o uso de modelos de simulação que já vêm sendo bastante testados e com sucesso, dar-se-á ênfase às etapas de modelagem a posteriori. Assim, serão apresentadas as definições estabelecidas por E. Rykiel Jr., em 1996, e descritas por Gomes e Varriale (2004).

## **Verificação**

Por definição, verificação consiste na demonstração de que o formalismo do modelo é correto. Existem dois tipos de erros ocorridos na verificação: lógicos e mecânicos. Os erros mecânicos correspondem a erros de programação ou de previsão do método numérico utilizado e incluem a utilização inadequada dos conceitos matemáticos envolvidos. Por outro lado, os erros lógicos, mais complexos de serem detectados, correspondem à lógica interna do programa. Convém lembrar que determinados tipos de erros ocorrem apenas em circunstâncias muito especiais, e, portanto, fogem à rotina.

A verificação avalia, em nível rigoroso e confiável, se as ideias desenvolvidas para o funcionamento do ecossistema foram incorporados no programa de computador ou no formalismo matemático. No caso de programas extensos, torna-se difícil verificar se o programa não implica erros na maioria de circunstâncias de operação. Além disto, as modificações no programa correspondem apenas a efeitos explicitamente desejados.

## **Calibração ou parametrização**

A etapa de calibração consiste na estimativa e ajuste dos parâmetros do modelo buscando melhorar a concordância entre as saídas do modelo e os dados experimentais disponíveis. Em outras palavras, a calibração consiste na etapa de tornar o modelo o mais consistente possível com os dados, a partir dos quais os parâmetros são extraídos, reduzindo assim a incerteza dos resultados.

## **Validação**

Validação é a demonstração de que um dado modelo, dentro do seu domínio de aplicabilidade, possui um espectro satisfatório de precisão, compatível com a aplicação prevista para o modelo. Assim, a validação é a comparação entre os dados modelizados com aqueles obtidos pela observação ou medidos no sistema real (GOMES e VARRIALE, 2004), dados esses que devem ser diversos aos empregados no desenvolvimento do modelo ou mesmo na sua calibração (LEAL e DE-POLLI, 1999).

Devemos constatar que essa demonstração indica que o modelo é aceitável para uso, o que não quer dizer de forma nenhuma que ele contenha alguma verdade absoluta, nem mesmo que seja o melhor modelo disponível.

## **Credibilidade**

Credibilidade consiste em um grau suficientemente grande de confiança na validade do modelo que justifique a sua utilização em pesquisa e tomadas de decisão. Assim, o conceito de credibilidade envolve um julgamento subjetivo e, portanto, não pode ser quantificado em nenhum sentido absoluto.

## **Uso de modelos de simulação e o avanço no conhecimento científico na agropecuária**

A experimentação e o desenvolvimento de modelos precisam avançar juntos. Novos conhecimentos são utilizados para refinar e melhorar modelos, e os modelos são usados para identificar lacunas no conhecimento existente, definindo assim, as prioridades de pesquisa. Sinclair e Seligman (1996) fazem uma observação semelhante, vendo modelos como uma forma de definir o nosso conhecimento em uma estrutura organizada, lógica e dinâmica, permitindo assim a identificação dos pressupostos errôneos e fornecendo novas perspectivas. Seligman (1990), por exemplo, lista os seguintes usos de modelos na pesquisa: (1) identificação de lacunas (gaps) no conhecimento existente, (2) geração e teste de hipóteses, e auxílio para o planejamento de experimentos, (3) determinação de parâmetros que mais influenciam em um sistema (análise de sensibilidade), (4) fornecimento de um meio para uma melhor comunicação entre os pesquisadores em diferentes áreas do conhecimento, e (5) unir pesquisadores, técnicos de extensão e os produtores para buscar soluções para problemas comuns.

Além de sua utilização como ferramenta na pesquisa, tem havido muitas tentativas nos últimos anos da utilização de modelos de culturas e de solos como ferramentas para ajudar nos processos de tomada de decisão dos profissionais, com o desenvolvimento dos chamados Sistemas de Suporte à Decisão (SSDs). Os SSDs evoluíram ao longo dos anos a partir de regras rudimentares para uma decisão única para programas computacionais (softwares) com múltiplos critérios de otimização para a tomada de decisões complexas.

Em sua forma mais simples, um SSD pode ser um limite ou índice calculado para o manejo de pragas usando relações empíricas e dados de campo em uma calculadora. Em uma forma mais sofisticada, pode ser um sistema computacional interativo que utiliza modelos de simulação, bases de dados e algoritmos de decisão de forma integrada.

SSDs normalmente têm saída quantitativa (em oposição a um sistema especializado com raciocínio qualitativo) e colocam a ênfase no usuário final para a resolução de problemas e tomadas de decisões. Não há uma linha clara entre os modelos utilizados em pesquisas e os utilizados em SSD. De fato, um modelo usado em um contexto de pesquisa pode fornecer informações usadas mais tarde para auxiliar na tomada de decisões. Muitas vezes, na literatura, os modelos usados em pesquisas são promovidos em termos de seu potencial para auxiliar na tomada de decisões, embora nem sempre haja evidência de que eles estão sendo usados para esse fim.

## **Principais limitações no uso de modelos de simulação de agroecossistemas**

A principal limitação na utilização de modelos de simulação para análise de tendências de longo prazo em sistemas de produção agropecuária é que eles ainda não foram totalmente validados, certamente não ao longo de um período de tempo relevante para julgar o seu comportamento em longo prazo. Isto é em parte devido à escassez de dados de boa qualidade em longo prazo, especialmente porque muitas variáveis necessárias para validar os modelos completamente não foram medidas e por isso, não compreendem os conjuntos de dados que existem. No entanto, tem havido esforços para comparar uma série de modelos em relação aos dados experimentais de longo prazo, visando a melhoria das estimativas dos mesmos (SMITH et al., 1997; ROSENZWEIG et al, 2013).

Uma segunda limitação é o entendimento parcial de muitos dos processos subjacentes. Por exemplo, a maioria dos modelos de culturas e de solos foi projetada originalmente para descrever o crescimento de culturas e processos do solo por uma estação ou safra, e as relações, relativamente simples, geralmente empregadas são normalmente adequadas para este período de tempo. No entanto, não se sabe se eles são capazes de descrever as alterações do solo em períodos de

tempo muito mais longos. O submodelo de nitrogênio do DSSAT, por exemplo, usa apenas um compartimento para representar a fração húmica do solo (TSUJI et al, 1994), sendo pouco provável que gere bons resultados em períodos mais longos.

A propagação de erros nos modelos pode ser outro problema potencial. Um pequeno erro pode ser relativamente sem importância para estimativas de curto prazo (alguns meses ou anos), mas ao longo de vários anos poderia acumular e resultar em erro substancial, podendo levar a uma interpretação errônea no final do período simulado.

Outras limitações dependem do modelo em particular. Por exemplo, o modelo de culturas DSSAT tem a necessidade de incorporar o efeito de: a) erosão; b) tipo de preparo do solo; c) de determinados fertilizantes na acidez do solo e no crescimento das culturas; d) salinidade sobre o crescimento das plantas; e) retardada lixiviação de nitrato no subsolo de alguns tipos de solos e; f) resíduos vegetais deixados na superfície em relação aos incorporados no solo.

No entanto, é altamente provável que a modelagem vai se tornar uma ferramenta cada vez mais importante nos estudos envolvendo sistemas de produção complexos e de sustentabilidade ambiental simplesmente porque não existem outras abordagens razoáveis para quantificar os complexos processos envolvidos.

## **Modelos de simulação de agroecossistemas com potencial para avaliar sistemas agrícolas**

Os modelos oferecem um meio fácil de ampliar a pesquisa para outros locais e, assim, minimizar a duplicação de pesquisa de campo. Eles também fornecem um meio pronto para transferir o conhecimento integrado e tecnologia para os agricultores e outros usuários. Modelos serão a única maneira de acabar com a sobrecarga de informação do século 21 (MATTHEWS et al.,2000; JONES et al., 2015). Em resposta

a estas necessidades, vários modelos que permitem uma abordagem de agroecossistema têm sido desenvolvidos. Embora estes modelos precisam ser testados e aperfeiçoados mais profundamente ao longo do tempo e do espaço, eles trouxeram o sentido da abordagem de sistema para a comunidade científica voltada para o setor agropecuário e novos entendimentos aos sistemas de produção agrícola.

Neste sentido, a seguir será apresentada uma breve descrição de alguns modelos de simulação que têm sido amplamente testados em nível mundial, agrupando-os de acordo com o seu foco principal, enfatizando-se as principais características e componentes e considerando o seu potencial de uso como ferramenta na avaliação de sistemas de produção agropecuária em regiões tropicais.

## **Modelos de simulação do crescimento de plantas**

### **O modelo APSIM**

O APSIM (Agricultural Production Systems Simulator) é resultado de uma convergência de duas tentativas anteriores de alcançar a combinação de três características principais, quais sejam: 1) modelos de culturas de alta sensibilidade; 2) capacidade de simular uma grande variedade de configurações de culturas, sequências, consórcios e práticas de manejo e os efeitos sobre a evolução da produtividade do solo; e 3) software que foi desenvolvido e testado. O primeiro, o PERFECT (LITTLEBOY et al., 1992), foi desenvolvido principalmente para simular os efeitos da erosão sobre a produtividade de vertissolos em regiões subtropicais australianas, influenciados pelo manejo do solo. A abordagem foi utilizar rotinas de culturas existentes com alta sensibilidade, juntamente com rotinas avançadas de manejo do solo, movimento de água no solo e erosão. Contudo, forneceu-se uma ferramenta útil para análise de sistemas, por exemplo, efeitos da erosão sobre a produtividade (LITTLEBOY et al., 1992) e risco climático (HAMMER et al., 1987), mas com o desenvolvimento contínuo e a extensão para outros usuários tendo sido dificultada pela inadequação na característica 3, acima citada. Um segundo desenvolvimento, o AUSIM (McCOWN e WILLIAMS, 1989), adotou o CERES-Maize como

um modelo de cultura para atender a característica 1. A característica 2 foi conseguida pela concepção de um sistema “liga-desliga” e uma reengenharia compreensiva do CERES-Maize para conseguir módulos altamente independentes de crescimento da cultura, água e nitrogênio do solo, permitindo a recombinação flexível de rotinas de culturas, a fim de simular rotações, consorciações, invasoras, etc, e para facilitar a transferência de melhorias do modelo. O investimento para atender a característica 3, além de fazer novos módulos altamente estruturados e altamente lógicos em termos de conteúdo de função, foi um teste abrangente de novo código. Os esforços das equipes de desenvolvimento do AUSIM e do PERFECT foram combinados para produzir o modelo APSIM, que vai além de seus antecessores em alcançar todas as três características.

O APSIM foi criado em resposta à necessidade de melhorar o planejamento e previsão da produção de culturas sob diferentes condições de solo, clima e gestão das propriedades rurais na Austrália (KEATING et al., 2003). O modelo consiste em 10 componentes que são descritos em detalhe por Keating et al. (2003), quais sejam: 1) culturas, pastagem e floresta; 2) balanço hídrico e movimento de solutos no solo; 3) matéria orgânica do solo e N; 4) resíduos; 5) fósforo; 6) pH do solo; 7) erosão; 8) manejo; 9) sistemas de rotação/consorciação/invasoras; e 10) simulações multi-pontos (PROBERT et al, 1998; KEATING et al, 2003). O componente de resíduos do APSIM, descrito por Probert et al. (1998), simula os resíduos sobre a superfície do solo separadamente da MOS e do resíduo incorporado. Este modelo apresenta a possibilidade de trabalhar em um passo de tempo mensal ou diário.

## **O modelo DSSAT**

O DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) (UEHARA e TSUJI, 1991) reúne diferentes modelos de cultura, tais como os modelos CERES (por exemplo, JONES e KINIRY, 1986), os modelos GRO (por exemplo, HOOGENBOOM et al., 1994) e SIMPOTATO (HODGES et al., 1992). Modelos deste tipo têm a sensibilidade aos extremos ambientais necessária para análises de riscos (CARBERRY et

al, 1989; KEATING et al, 1993). Mas, apesar de certos efeitos do manejo do solo e da cultura sobre o suprimento de água e de nitrogênio para as culturas poderem ser simulados (KEATING et al., 1991), a falta de meios prontos para simular os efeitos cumulativos de culturas sobre o solo impede o DSSAT de ser um modelo de simulação de sistemas de cultivo. Como cada modelo de cultura tem suas próprias rotinas de solo, uma mudança de cultura gera a necessidade de que sejam especificadas as propriedades e condições iniciais do solo. Versões mais recentes do modelo, como o DSSAT-CSM (DSSAT - Cropping System Modeling) buscaram solucionar esta limitação.

O DSSAT-CSM simula o crescimento, desenvolvimento e rendimento de uma cultura crescendo em uma área uniforme sob manejo prescrito ou simulado, bem como as alterações, na água do solo, C e N, que ocorrem sob o sistema de cultivo ao longo do tempo. O DSSAT-CSM tem um programa principal condutor, um módulo de unidade de terra e os módulos para os componentes primários que compõem uma unidade de terra em um sistema de cultivo. Os módulos principais são: 1) clima; 2) solo; 3) interface solo-planta-atmosfera; 4) modelo de cultura (CROPGRO) que é um modelo de cultura genérico; 5) interface para modelos de cultura individual que permite linkar o DSSAT-CSM com o CERES-Maize, por ex.; 6) manejo; e 7) pragas. Coletivamente, esses componentes descrevem as alterações ao longo do tempo no solo e plantas que ocorrem em uma dada unidade de terra em resposta às condições climáticas e de manejo. Em contraste com versões anteriores do DSSAT e seus modelos de culturas, o DSSAT-CSM incorpora modelos de todas as culturas dentro de um conjunto, permitindo que todas as culturas utilizem os mesmos componentes do módulo de solo. Esta característica simplifica a simulação de rotações de culturas, já que os processos do solo operam continuamente, e diferentes culturas são plantadas, manejadas e colhidas de acordo com informações do sistema de cultivo fornecidos como entradas para o modelo.

No módulo original de transformações de N do solo usado no DSSAT, assim como outros modelos de culturas, o DSSAT baseia-se em um submodelo originalmente projetado para sistemas agrícolas de alta adição de insumos (SELIGMAN e VAN KEULEN, 1981). Algumas dessas limitações foram resolvidas com a substituição, por Gijssman et al. (1999), de rotinas do modelo CENTURY (KELLY et al., 1997) que é um modelo de matéria orgânica do solo mais abrangente e bem testado. Testes com este modelo modificado (DSSAT-CENTURY) em comparação com um conjunto de experimentos sobre a decomposição de resíduos de leguminosas no Brasil (BOWEN et al., 1992) mostraram boa concordância entre os dados observados e simulados (GIJSMAN et al., 1999), embora ainda possa haver limitações em solos altamente intemperizados (GIJSMAN et al., 1996).

Cada módulo tem seis passos operacionais, que são: executar a inicialização; época de inicialização; cálculos de taxas; integrações; saídas diárias; e sumarização das saídas. O programa principal controla quando cada uma dessas etapas está ativa, e quando cada módulo executa a tarefa que é programado para desempenhar. Este recurso permite a cada módulo ler suas próprias entradas, inicializar-se, calcular taxas, integrar as suas próprias variáveis de estado e escrever as saídas completamente independente da operação dos outros módulos. Isto permite que um módulo seja “desligado” e substituído por um diferente, desde que este último informe as mesmas variáveis para os demais módulos, mesmo se os parâmetros, variáveis de estado e arquivos de entrada do módulo adicionado sejam diferentes.

Variáveis de estado são escritas após a integração para representar o estado do sistema no fim do dia, e os valores iniciais são escritos durante a inicialização para o dia 0 (zero). Mais detalhes deste desenho modular podem ser encontrados em Porter et al. (2000).

## **Modelos de simulação de perdas de solo e água (erosão)**

Vários modelos hidrológicos de qualidade de água em escala de microbacias foram desenvolvidos (HSPF, HEC-HMS, CREAMS e SWRRB, por ex.) e são muito úteis, porém eles são geralmente limitados em vários aspectos de modelagem de bacias hidrográficas tais como escala inadequada, incapacidade de realizar simulação de tempo contínuo, número máximo de sub-microbacias inadequado e a inability para caracterizar suficientemente a bacia hidrográfica em detalhe espacial (SALEH et al., 2000). No entanto, os modelos EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) (WILLIAMS et al., 1989) e SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (ARNOLD et al., 1998) têm sido bastante estudados e apresentaram sucesso na avaliação da hidrologia e qualidade da água em bacias hidrográficas. Estas ferramentas têm sido usadas extensivamente em todo o mundo (WILLIAMS, 1990; GASSMAN et al., 2007). Entretanto, algumas lacunas significativas na capacidade de simular os importantes processos na paisagem em nível de propriedade ou em escala de microbacia hidrográfica persistiram apesar da versatilidade dos modelos EPIC e SWAT. Para preencher tais lacunas foi desenvolvimento do modelo APEX (Agricultural Policy Environmental EXtender) (WILLIAMS et al, 1995; WILLIAMS, 2002; WILLIAMS e IZAURRALDE, 2006; WILLIAMS et al, 2006; WILLIAMS et al., 2008).

### **O modelo SWAT**

O SWAT é um modelo de simulação contínua de longo prazo em bacia hidrográfica com um alto nível de detalhamento espacial, um número ilimitado de subdivisões de bacias hidrográficas e a capacidade de simular mudanças no manejo da terra. Ele opera em um passo de tempo diário e é projetado para prever o impacto do manejo na água, sedimentos e rendimentos agrícolas. O modelo é fisicamente baseado, computacionalmente eficiente e capaz de simular um elevado nível de detalhe espacial ao permitir que a divisão de bacias hidrográficas em sub-bacias menores. O SWAT simula o fluxo de água, transporte de sedimentos, crescimento de culturas/vegetação e ciclagem de

nutrientes. O modelo permite aos usuários modelar bacias hidrográficas com menos dados de monitoramento e avaliar cenários preditivos utilizando dados de entrada alternativos como clima, práticas de uso da terra, e cobertura da terra sobre o movimento da água, ciclagem de nutrientes, a qualidade da água, etc. Componentes principais do modelo incluem clima, hidrologia, temperatura do solo, crescimento de plantas, nutrientes, pesticidas e manejo da terra. Vários componentes do modelo têm sido previamente validados para uma variedade de bacias hidrográficas.

No SWAT, uma bacia hidrográfica é dividida em múltiplas sub-bacias, que são subdivididas em Unidades de Resposta Hidrológica (URHs) que são homogêneas quanto ao uso da terra, manejo e características do solo. As URHs representam porcentagens da área da sub-bacia e não são identificadas espacialmente dentro de uma simulação do SWAT. O balanço hídrico de cada URH na bacia é representado por quatro volumes de armazenamento: neve, perfil do solo (0-2 metros), aquífero raso (tipicamente 2-20 metros) e aquíferos profundos (mais de 20 metros). O perfil do solo pode ser subdividido em múltiplas camadas. Os processos de água no solo incluem infiltração, evaporação, absorção pelas plantas, fluxo lateral e percolação para as camadas mais profundas. As cargas oriundas de fluxo de sedimentos, nutrientes e pesticidas de cada URH em uma sub-bacia são somadas, e as cargas resultantes são encaminhadas através de canais, lagoas e/ou reservatórios para a saída da bacia hidrográfica. As descrições detalhadas do modelo e dos seus componentes podem ser encontradas em Arnold et al. (1998) e Neitsch et al. (2005).

Uma aplicação inicial do modelo por Arnold e Allen (1996) comparou os resultados do SWAT para vazão histórica e fluxo de água subterrânea em três bacias hidrográficas no Estado de Illinois. Os autores descobriram que o modelo foi capaz de simular todos os componentes hidrológicos dentro de limites aceitáveis tanto em passo de tempo anual como mensal. O Serviço de Conservação de Recursos Naturais (NRCS) utilizou o modelo SWAT em 1997 na avaliação de conservação de recursos. O modelo foi validado contra a vazão medida e as cargas

de sedimentos nos EUA (ARNOLD et al., 1999). O efeito da agregação espacial no SWAT foi examinado por FitzHugh e Mackay (2000) e Jha et al. (2004a). Aplicações do SWAT para fluxo e/ou cargas poluentes foram comparadas favoravelmente com os dados medidos para uma variedade de escalas de bacias hidrográficas (SRINIVASAN et al, 1998; ARNOLD et al, 1999; SALEH et al, 2000; SANTHI et al, 2001). O modelo SWAT foi aplicado com sucesso para avaliar o impacto das mudanças climáticas na hidrologia do Alto da Bacia do Rio Mississippi (JHA et al., 2004b) e da Bacia do Rio Missouri (STONE et al., 2001). O modelo SWAT foi escolhido pela Agência de Proteção Ambiental para ser um dos modelos de Melhor Avaliação da Ciência Integrando Fontes Pontuais e Difusas (BASINS) (WHITTEMORE, 1998).

Aplicações do SWAT vão desde estudos hidrológicos e de validação de perda de poluentes (ARNOLD et al, 2000; SALEH et al, 2000; JHA et al, 2007; REUNGSANG et al, 2007; STEHR et al, 2008), até avaliações hidrológicas das mudanças climáticas, reservatórios, zonas húmidas e mudanças do uso da terra em diferentes escalas de bacias hidrográficas (JHA et al, 2006; GOSAIN et al, 2006; GREEN et al., 2006; WU e JOHNSTON, 2007; JONES et al, 2008; WANG et al, 2008; e CAO et al, 2008), com as melhores práticas de manejo (MPM), uso da terra e outras análises de cenários de perdas de poluentes. (NELSON et al, 2005; SECCHI et al, 2007; VOLK et al, 2008; GHEBREMICHAEL et al, 2008; PARAJULI et al, 2008), para o balanço hidrológico, mudanças climáticas e outras análises de bacias de grandes rios ou sistemas de recursos hídricos em nível nacional, sub-continente, ou continente inteiro (ARNOLD et al, 1999; THOMSON et al, 2003; SCHUOL et al, 2008a, b).

## **O modelo EPIC**

O EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) (WILLIAMS, 1990) é um modelo amplamente testado e adaptado, construído originalmente para quantificar os efeitos da erosão do solo sobre a produtividade (WILLIAMS et al., 1989). Desde a sua criação, o EPIC evoluiu para um modelo de agroecossistema capaz de simular o crescimento de plantas

cultivadas em rotações complexas e operações de manejo, tais como preparo do solo, irrigação, fertilização e calagem (WILLIAMS, 1995).

O EPIC utiliza o conceito de eficiência do uso da radiação através do qual uma fração da radiação fotossinteticamente ativa diária é interceptada pela parte aérea das plantas e convertido em biomassa vegetal. Ganhos diários em biomassa vegetal são afetados por déficits de pressão de vapor e concentração de  $\text{CO}_2$  atmosférico (STOCKLE et al., 1992a, b). Índices de estresse de temperatura, água, N, P e aeração são calculados diariamente utilizando o valor do mais limitante destes fatores para reduzir o potencial de crescimento das plantas e de rendimento da cultura. Do mesmo modo, fatores de estresse para a resistência do solo a penetração, temperatura e toxicidade de alumínio são usados para ajustar o crescimento potencial da raiz (JONES et al., 1991). Atualmente, o EPIC pode simular cerca de 100 espécies de plantas incluindo culturas, pastagens nativas e florestas. Até 12 espécies de plantas crescendo em conjunto em uma lavoura podem ser simuladas, seguindo os conceitos desenvolvidos no modelo ALMANAC (KINIRY et al., 1992). O clima diário pode ser estimado a partir da precipitação, temperatura do ar, radiação solar, vento e os parâmetros de umidade relativa, ou pode ser inserido a partir de registros históricos. Os valores para as propriedades do solo, incluindo a profundidade da camada de solo, textura, densidade e concentração C são necessárias para inicializar o EPIC.

Os principais componentes do modelo são: ciclo de nutrientes; o crescimento de plantas; práticas de manejo; simulação de clima; ciclo hidrológico, de pesticidas e de nutrientes; temperatura e umidade do solo; e processos de erosão e deposição. O EPIC é um modelo de simulação contínua com passo de tempo diário. O processo de erosão hídrica é modelado por diversas equações, dependendo das condições. As equações utilizadas são USLE e suas duas modificações: MUSLE e USLE modificada por Onstad e Foster (1975). Essas equações modificadas incluem variáveis de escoamento para a formulação de energia erosiva, aumentando assim a precisão de predição da erosão. Este modelo contém algoritmos que permitem uma descrição

completa do balanço hidrológico em uma escala de pequena microbacia hidrográfica (até 100 ha). Processos calculados incluem o derretimento da neve, escoamento superficial, infiltração, conteúdo de água do solo, percolação, fluxo lateral, dinâmica da lâmina de água e evapotranspiração. Seis métodos de evapotranspiração estão disponíveis, mas apenas um, o método de Penman-Monteith, pode ser usado em estimativa dos efeitos de do aumento de CO<sub>2</sub> (STOCKLE et al., 1992a). A erosão eólica é calculada em um intervalo de tempo diário com base na distribuição da velocidade do vento e ajustado de acordo com as propriedades do solo, rugosidade superficial, cobertura vegetal e da distância ao longo do caminho do vento (POTTER et al., 1998). A erosão hídrica é calculada como uma função da energia da chuva e do escoamento. Seis equações com base na equação universal de perda de solo (USLE) estão disponíveis para o usuário (WILLIAMS, 1995). O submodelo de preparo de solo no EPIC simula a mistura de nutrientes e resíduos de culturas dentro da camada arável. Também simula as mudanças na densidade do solo, converte resíduo em pé para resíduos deitados sobre a superfície e determina o topo e a rugosidade da superfície. A temperatura de cada camada de solo é calculada diariamente, de acordo com as equações descritas no Potter e Williams (1994) e utilizado de ciclagem de nutrientes e sub-rotinas hidrológicas.

O modelo EPIC é um modelo abrangente em desenvolvimento contínuo desde 1981, capaz de simular vários processos que ocorrem na terra como resultado de forçantes climáticas, características da paisagem, condições do solo e sistemas de manejo (WILLIAMS, 1995). Processos biofísicos simulados nas versões recentes do EPIC incluem: o crescimento das plantas (culturas), o balanço hídrico e de calor, erosão hídrica e eólica e ciclagem de nutrientes. As versões anteriores do EPIC utilizavam o modelo PAPRAN de Seligman e van Keulen (1981) para calcular as transformações de N e sua dinâmica. Essas transformações foram, por sua vez, utilizadas para estimar o C orgânico do solo (COS) em todo o perfil do solo. Assim, EPIC não tinha os componentes C necessários para explicar de forma realista a natureza interativa das

transformações de C e N no solo. Em vez de desenvolver um modelo novo C, os desenvolvedores do EPIC selecionaram o modelo CENTURY (PARTON et al., 1994) como a base sobre a qual construir novos módulos C e N no EPIC. Atualmente o EPIC simula a ciclagem de MOS em 10 horizontes do solo, incluindo o topo de 1 cm de profundidade, o que é importante considerando que a erosão é um processo de superfície.

Existem pelo menos quatro distinções entre os modelos CENTURY e EPIC em relação às transformações orgânicas. Primeiro, as equações de lixiviação atualmente implementadas no EPIC, que utiliza um coeficiente de partição linear e conteúdo de água do solo para calcular o movimento como modificado pela sorção, são usadas para mover materiais orgânicos oriundos da liteira de superfície para as camadas subsuperficiais. Em contraste, o CENTURY utiliza a água mensalmente lixiviada abaixo da profundidade de 30 cm no solo, teor de areia e de argila. Segundo, no EPIC, os controles de temperatura e de água que afetam as taxas de transformação são calculados com as equações atuais. Em terceiro lugar, a fração liteira de superfície no EPIC tem um compartimento lento em adição aos componentes da liteira metabólica e estrutural do CENTURY. E por último, a concentração de lignina no EPIC é modelada como uma função sigmoidal da idade da planta, sendo uma função da precipitação anual no CENTURY.

A partir deste ponto de vista, EPIC e CENTURY são semelhantes a outros modelos de que permitem a modelagem da dinâmica da MOS, tal como, por exemplo, RothC e DSSAT. No entanto, RothC tem um compartimento de COS inerte enquanto o EPIC e o CENTURY não têm. Como o CENTURY, o EPIC utiliza um compartimento para representar da biomassa microbiana.

Uma característica fundamental que diferencia EPIC de outros modelos de MOS e ecossistemas terrestres é a sua capacidade para estimar as perdas de COS causadas pela erosão eólica e hídrica. Neste sentido, o EPIC simula os efeitos da erosão hídrica e da deposição sobre o conteúdo de COS calculando a erosão diretamente e integrando com

a dinâmica do C. Uma característica bastante singular no EPIC reside na sua capacidade de estimar as alterações na densidade do solo e profundidade do solo causadas por alterações no conteúdo de COS em função da respiração do solo e da erosão. Deste modo, o EPIC trata explicitamente as alterações na matriz do solo (densidade, porosidade e retenção de água), bem como alterações nos constituintes do solo, como o C orgânico, por exemplo. Assim, o EPIC tem potencial para simular os fluxos de gases traços, incluindo os que derivam de desnitrificação e nitrificação baseados no suprimento de elétrons e na competição por aceptores de elétrons em condições onde a umidade do solo e as propriedades da matriz de solo variam simultaneamente. Além disso, o EPIC emprega uma geração estocástica de variáveis meteorológicas tais como precipitação, temperatura do ar, radiação solar, umidade e velocidade do vento, que lhe permite modelar grandes eventos raros, dado que o tempo de simulação é substancial. Abordagem estocástica é uma vantagem sobre modelo CENTURY, onde a perda de solo somente é calculada como média mensal ou anual.

Lee et al. (1996) utilizaram o modelo EPIC para determinar a sensibilidade do C do solo à variação na temperatura e precipitação na região do Cinturão do Milho nos EUA. Foi mostrado que, durante uma simulação de 100 anos o estoque total de C no solo diminuiu 27%, dos quais metade foi transportada, pela erosão, para fora da área estudada. A taxa de erosão foi estimada em  $8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Redução um pouco menor, 10 - 11%, do C total, durante uma simulação de 100 anos, foi atribuída à erosão em um estudo em lavouras de Illinois sob preparo convencional do solo e taxa de erosão de  $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (PHILLIPS et al. 1993). A emissão de  $\text{CO}_2$  a partir de sedimentos depositados não poderia ser explicitamente calculada pelo EPIC, o que explica as diferenças nas simulações comparando com o CENTURY e sugere que a erosão induz a perdas que podem ser ainda maiores se for assumido que há aumento na decomposição da MOS devido à perturbação do sedimento.

Exemplos de aplicações do EPIC incluem, em nível de parcelas experimentais e/ou de campo, avaliações de sedimentos, nutrientes e perda de pesticidas em função de diferentes sistemas de cultivos e de manejo (JACKSON et al, 1994; CHUNG et al, 2002; LU et al. , 2003; WANG et al, 2006b), em nível de campo, o rendimento da cultura, ciclo do nitrogênio e avaliações de sequestro de carbono do solo (WILLIAMS et al, 1989; CABELGUENNE et al, 1990; CAVERO et al, 1999; WANG et al. , 2005; IZAURRALDE et al, 2006), em nível regional, avaliações de lixiviação de nitrogênio, o sequestro de carbono no solo e outros indicadores ambientais (WU e BABCOCK, 1999; CEPUDER e SHUKLA, 2002; GAISER et al, 2008), incluindo as interfaces com análises econômicas (FENG et al 2005; e 2007) e avaliações globais de produtividade de grãos em função da mudança do clima, mudanças no uso da terra e manejo da água (TAN e SHIBASKI, 2003; WU et al, 2007; LIU et al, 2007).

## **O modelo APEX**

Lacunas significativas na capacidade de simular os importantes processos na paisagem em nível de propriedade ou em escala de microbacia hidrográfica persistiram apesar da versatilidade dos modelos EPIC e SWAT. Essa limitação foi revelada de forma aguda no projeto “Pecuária e Meio Ambiente: Um Projeto Piloto Nacional” (NPP), que foi encomendado no início de 1990 para tratar da qualidade da água e outros problemas ambientais associados à produção de pecuária intensiva. Um dos principais objetivos do deste projeto foi avaliar uma ampla gama de cenários alternativos de manejo de esterco que incluíram combinações relativamente complexas de paisagens em nível de propriedade, sistemas de cultivo e/ou práticas de manejo. Assim, o NPP serviu como um catalisador para o desenvolvimento das versões iniciais do modelo APEX (Agricultural Policy Environmental EXtender) (WILLIAMS et al, 1995; WILLIAMS, 2002; WILLIAMS e IZAURRALDE, 2006; WILLIAMS et al, 2006; WILLIAMS et al., 2008), que preencheu a lacuna que existia entre os modelos EPIC e SWAT.

O modelo APEX é uma ferramenta flexível e dinâmica que é capaz de simular o impacto do manejo e do uso da terra para fazendas

inteiras e pequenas bacias hidrográficas. O APEX é essencialmente uma versão multi-campo do modelo EPIC e pode ser executado para lavouras individuais, similarmente ao EPIC, bem como para uma fazenda inteira ou uma bacia hidrográfica que se subdivide com base nas lavouras, tipos de solo, posições na paisagem ou sub-bacias. O APEX, em um passo de tempo diário, pode realizar simulações contínuas de longo prazo, podendo ser usado para simular os impactos de diferentes práticas de manejo de nutrientes, operações de preparo do solo, práticas conservacionistas, sistemas alternativos de cultivo e outras práticas de manejo sobre o escoamento superficial e perdas de sedimentos, nutrientes e outros indicadores de poluição. O modelo também pode ser configurado para as estratégias de manejo de áreas novas, tais como impactos de faixas de retenção para evitar perdas de poluentes em lavouras conduzidas em áreas de encosta, cenários de pastejo rotacionado intensivo descrevendo o movimento do gado entre piquetes, caminhos de acesso aos bebedouros (cursos de água) vegetados com gramados em combinação com impactos das faixas de retenção, e aplicação no solo de dejetos removidos de confinamentos de gado ou lagoas de armazenamento de resíduos. Rotas de água e poluentes podem ser simuladas entre subáreas e através de sistemas de canais no modelo. De acordo com Srivastava et al. (2007), o APEX é um dos poucos modelos existentes, que é capaz de simular a rota do fluxo e o transporte de poluentes em escala de campo.

O código APEX está escrito em FORTRAN e pode ser executado em um PC (para a maioria dos sistemas operacionais) e também em uma plataforma UNIX. O modelo é composto por 12 componentes principais: hidrologia, clima, crescimento das plantas, o destino de pesticidas, ciclagem de nutrientes, erosão e deposição, ciclo do carbono, as práticas de manejo, temperatura do solo, controle do ambiente da planta, condições econômicas e subáreas/rotas. Capacidades de manejo incluem irrigação por gotejamento, aspersão ou sulcos, drenagem, diques, faixas de proteção, terraços, cursos de água, adubação, manejo de dejetos, lagoas, reservatórios, rotação de culturas e seleção, plantas de cobertura, a remoção da biomassa, aplicação de pesticidas,

pastagem e preparo de solo. Simulação de aplicações de resíduos líquidos provenientes de tanques ou lagoas de armazenamento de resíduos em áreas de confinamento animal é um componente-chave do modelo. O armazenamento e a subsequente aplicação, no solo, de dejetos sólidos em áreas de confinamento ou outras áreas de alimentação animal também podem ser simulados pelo APEX. Componentes de águas subterrâneas e reservatórios foram incorporados no APEX em adição aos algoritmos de rotas. Os mecanismos de roteamento permitem a avaliação das interações entre as subáreas envolvendo o escoamento superficial, o fluxo de retorno, a deposição de sedimentos e degradação, o transporte de nutrientes e fluxo de águas subterrâneas. A qualidade da água em termos de N e P solúveis e orgânicos e perdas de pesticidas pode ser estimada para cada subárea e na saída da bacia.

Armazenamento e posterior aplicação, no solo, de esterco sólido oriundo do confinamento ou outras áreas de alimentação animal também pode ser simulado em APEX. Componentes de águas subterrâneas e reservatórios têm sido incorporados no APEX em adição aos algoritmos de roteamento. Os mecanismos de roteamento fornecem a avaliação das interações entre as subáreas que envolvem o escoamento superficial, o fluxo de retorno, a deposição de sedimentos e degradação, transporte de nutrientes e fluxo de águas subterrâneas. A qualidade da água em termos de N e P solúveis e orgânicos e as perdas de pesticidas podem ser estimadas para cada subárea e na saída da bacia.

## **Modelos de simulação da dinâmica da matéria orgânica do solo**

### **O modelo CENTURY**

O Modelo de Matéria Orgânica do Solo Century (CENTURY) é um modelo dinâmico de ecossistemas terrestres que vem sendo utilizado com sucesso no estudo da dinâmica do carbono orgânico em solos nas mais diversas regiões e biomas do mundo (PARTON et al., 1987; PAUSTIAN et al., 1992; METHERELL et al., 1994).

O CENTURY foi desenvolvido para simular em longo prazo (décadas a séculos) a dinâmica da MOS, o crescimento e produção vegetal e ciclagem de N, P e S em diversos biomas, tipo de solo e clima. Ele foi originalmente desenvolvido para pastagem naturais, e, posteriormente, adaptado para solos sob cultivos agrícolas, florestais e savanas, passando a incluir o efeito do preparo de solo sobre as taxas de decomposição (PARTON, 1996b). Versões mais recentes do modelo incluem perdas de C e N por lixiviação, retiradas por colheitas e efeito de cultivo (METHERELL et al., 1994; KELLY et al., 1997). O CENTURY utiliza um passo de tempo mensal com dados médios mensais de temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação (PARTON et al., 1987b; PARTON e RASMUSSEN, 1994; PARTON, 1996b). É composto por duas formas de liteira, a metabólica e a estrutural, e três compartimentos de MOS, o ativo, o lento e o passivo. Do C que sai do compartimento ativo parte é emitida como CO<sub>2</sub> e parte é transferida para o compartimento lento, sendo que esse particionamento é determinado pela textura do solo. A textura do solo também regula a taxa de transferência entre os compartimentos lento e passivo. O CENTURY tem sido usado para simular a acumulação C durante a formação do solo (PARTON et al., 1987a), e alterações dos estoques de C do solo a partir de cenários de mudanças climáticas (SCHIMEL et al., 1994). Assim, a inclusão da temperatura e regime de água do solo, do efeito da textura na dinâmica da MOS e da rotina detalhada dos nutrientes N, P e S as plantas torna o CENTURY aplicável em clima temperado e tropical (PARTON et al., 1994).

O programa computacional propriamente dito (CENTURY 4.0) consiste em uma versão DOS com arquivo executável na linguagem FORTRAN que necessita de um conjunto de arquivos de entrada com parâmetros e variáveis do modelo, bem como um arquivo de saída de dados. Dentre os arquivos, destacam-se os chamados arquivo local (SITE.100) e o arquivo dos cenários de manejo (\*.SCH). No arquivo local, são indicadas todas as informações iniciais de localização geográfica, clima e solo da área a ser estudada. No arquivo do cenário de manejo são informadas todas as atividades de manejo realizadas nesta área,

sendo estas organizadas de modo qualitativo, quantitativo e temporal o que possibilita dividir o cenário de manejo em blocos e reconstituir o histórico de manejo da área num único arquivo.

No arquivo \*.SCH, podem ser listadas atividades que envolvem diferentes práticas de manejo de solo, tipos de florestas, remoção de floresta, tipos de culturas, fertilização mineral com N, P e S, irrigação, fertilização orgânica, queimada, colheita e pastejo, sendo que os parâmetros relacionados a estas atividades são definidos nos arquivos acessórios CULT.100, TREE.100, TREM.100, CROP.100, FERT.100, IRR.100, OMAD.100, FIRE.100, HARV.100 e GRAZ.100, respectivamente.

Existe ainda outro arquivo, o FIX.100, que contém parâmetros internos também chamados de “parâmetros fixos” e que são apropriados para o bioma Pradarias Norte-americanas. No entanto, estão disponíveis parametrizações alternativas para outros biomas (Florestas Tropicais, Florestas Temperadas, Desertos e Savanas), os quais devem ser escolhidos em função do bioma referente à região em que a área a ser simulada se localiza, pois contêm alguns parâmetros essenciais do modelo que dificilmente são alterados, como, por exemplo, taxas de decomposição de compartimentos, coeficientes de equações diversas, frações de nutrientes (N, P e S) disponíveis para as plantas, relações C/N máximas e mínimas que controlam o fluxo de C e N nos diferentes compartimentos da MOS, frações de N perdidas por volatilização e lixiviação, entre outros.

No modelo CENTURY, o submodelo do C é constituído pelo sistema solo-planta, que está dividido em oito compartimentos principais. A cobertura vegetal é separada em resíduo de superfície, que corresponde ao C da parte aérea das plantas, e de solo, correspondente ao C das raízes. Estas frações são subdivididas em dois tipos de compartimentos, conforme a relação lignina/nitrogênio (L/N), o metabólico e o estrutural. O C do compartimento metabólico tem pronta degradação, especialmente aquele oriundo das raízes, que, por estar em maior contato com o solo, é facilmente atacado pelos microrganismos, enquanto o C metabólico da parte aérea será

incorporado na biomassa microbiana superficial. Os compartimentos estruturais têm decomposição mais lenta (METHERELL et al., 1994).

Na MOS, por sua vez, o C é separado em 3 compartimentos: C orgânico ativo, C orgânico lento e C orgânico passivo, definidos pelo tempo de permanência no solo, o qual varia de um mês a 3 anos no compartimento ativo, de 20 a 30 anos no lento e de 400 a 2000 anos no passivo. De outra parte, o compartimento ativo pode ser associado às biomassas microbiana e de plantas e seus subprodutos ou exudatos de fácil degradação. Compostos de decomposição mais difícil que os anteriores, que estão fisicamente protegidos devido à interação das suas moléculas com minerais do solo, podem ser associados ao compartimento lento. E por último, compostos quimicamente recalcitrantes e que podem estar física ou coloidalmente protegidos, sendo então de elevada permanência no solo associam-se mais ao compartimento passivo (PARTON et al., 1987; METHERELL et al., 1994; LEAL e DE-POLLI, 1999).

As entradas de C no sistema solo-planta consideradas pelo modelo CENTURY, são representadas pelo C da biomassa vegetal acima e abaixo do solo e, as principais saídas de C do sistema são representadas pelo C perdido por erosão, lixiviação e o C removido pela colheita.

## **O modelo ROTHC**

O ROTHC é o modelo de C de Rothamsted em que o ciclo de C em solos aerados é sensível ao tipo de solo, temperatura, umidade e plantas de cobertura (JENKINSON et al, 1991; COLEMAN e JENKINSON, 1996). No ROTHC, as dinâmicas do N e do C não estão interligadas, a matéria orgânica inerte (MOI) é quantificada utilizando C-marcado e os valores iniciais são obtidos através da execução do modelo em condições de estado-estável (steady-state). Ao contrário de outros modelos existentes, o ROTHC tem sido utilizado para calcular entradas de matéria orgânica para o solo (JENKINSON e COLEMAN, 1994) e produtividade primária líquida (JENKINSON et al., 1992) usando a MOS e radiocarbono medidos. Isto é formulado como uma soma-

de-exponenciais discreta que pode ser transformada numa forma contínua, que pode produzir resultados analíticos que podem fornecer informações adicionais úteis sobre a ciclagem da MOS (PARSHOTAM, 1995). Este modelo usa principalmente dados de entrada mensais, e compartilha várias outras ideias básicas com o modelo CENTURY (COLEMAN e JENKINSON, 1996).

## **Modelos de simulação da dinâmica de nutrientes**

### **O modelo ANIMO**

O ANIMO (Agricultural Nutrient Model) é um modelo de simulação com processos orientados detalhados para a avaliação da lixiviação de nitratos para águas subterrâneas, cargas de N e P em águas superficiais e de emissão de gases de efeito estufa (GEE) (BERGHUIJS-VAN DIJK et al., 1985). O modelo é usado principalmente para a avaliação da política e legislação de fertilização em escala regional e nacional. O ANIMO visa quantificar a lixiviação de nutrientes e as emissões de GEE, em função do nível de fertilização do solo, manejo do solo e da água e uso da terra, considerando diversos tipos de solo e condições hidrológicas. O modelo compreende um grande número de formulações de processos simplificados. O ANIMO simula a dinâmica dos ciclos de C, N e P em sistemas de solo insaturados e saturados. O modelo foi desenvolvido para analisar a lixiviação de N a partir da superfície do solo para as águas subterrâneas e superficiais. A simulação opcional do ciclo do P foi adicionada ao modelo. Dados hidrológicos não são estimados pelo ANIMO devendo ser fornecidos por outro modelo.

O modelo é representado por uma coluna de solo multi-camadas unidimensionais. O limite superior é a superfície do solo, o limite inferior é a profundidade do fluxo de água subterrânea local e o limite lateral é definido pelo(s) sistema(s) de água de superfície. Os principais processos incluídos no modelo são: mineralização e imobilização, a absorção pelas plantas, desnitrificação relacionada com (parcial e temporal) anaerobiose e decomposição de materiais orgânicos, distribuição de oxigênio e de temperatura no solo, nitrificação, dessorção e adsorção de  $\text{NH}_4^+$  (amônio) e de P para o complexo de

trocas do solo, escoamento superficial, descarga para os diferentes sistemas de águas superficiais e lixiviação para as águas subterrâneas.

A demanda de oxigênio, a produção de exudato, as taxas de decomposição de quatro tipos de matéria orgânica, a taxa de nitrificação, as taxas de sorção de  $\text{NH}_4^+$  e de P, os 14 fluxos de água (precipitação, escoamento superficial, infiltração, lixiviação, drenagem e infiltração de primeira, segunda e terceira ordem, três termos de evaporação e transpiração) são taxas variáveis representados no modelo ANIMO. Enquanto as variáveis de estado são: teores de umidade, quantidade de exudato, húmus, matéria orgânica fresca e solúvel,  $\text{NH}_4^+$  e fosfato adsorvidos e nitrato,  $\text{NH}_4^+$  e fosfato na solução do solo.

O modelo ANIMO possui cerca de 80 variáveis de entrada, a quais correspondem a um balanço hídrico prolongado do solo, manejo da adubação (quantidade, tipo de fertilizante, época e profundidade de aplicação), propriedades físicas do solo (densidade, 5 parâmetros de temperatura e coeficientes de difusão de oxigênio no solo), propriedades químicas do solo (pH, coeficientes de sorção e as taxas de sorção) e condições iniciais e de contorno. Com relação às variáveis de saída, o ANIMO possui mais de 1000 variáveis e correspondem a todos os termos do balanço de água completo de um sistema solo-água-planta, o N na forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), o N na forma de amônio, o P na forma de orto-fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) e o P na forma orgânica. O intervalo de simulação é de 1 a 30 dias e a unidade básica de superfície é o metro quadrado ( $\text{m}_2$ ).

O ANIMO tem sido incorporado na plataforma STONE, que se destina a avaliação dos efeitos das mudanças no setor agrícola e as medidas políticas na lixiviação de N e P para águas subterrâneas e superficiais (ANIMO, 2012)

## O modelo RZWQM

O modelo RZWQM (Root Zone Water Quality Model) consiste de seis subsistemas ou processos que representam um sistema agrícola completo. Cada subsistema tem sido ilustrado em detalhe na documentação técnica do RZWQM (AHUJA et al, 1999a.) e em outras publicações (RZWQM Team, 1998; AHUJA et al, 1998b). Em geral, o RZWQM é um modelo que integra processos físicos, biológicos e químicos e simula o crescimento das plantas e o movimento de água, nutrientes e pesticidas sobre e através da zona radicular em uma área representativa de um sistema agrícola de produção. Trata-se de um modelo uni-dimensional (vertical em direção ao perfil do solo) projetado para simular as condições com base numa unidade ou área. Embora a principal zona de foco seja a zona das raízes das plantas, o modelo pode ser estendido para zonas não saturadas mais profundas.

O modelo permite a simulação de um amplo espectro de práticas e cenários de manejo. Estas alternativas de manejo incluem a avaliação do preparo conservacionista e cobertura vegetal em relação ao preparo convencional do solo, métodos e época de aplicação de fertilizantes e pesticidas, adubos químicos e formulações alternativas, tecnologias de irrigação e drenagem, métodos e época das aplicações de água, e diferentes rotações de culturas. O modelo contém características especiais, tais como o rápido transporte de produtos químicos aplicados na superfície através de macroporos para profundidades maiores e o transporte preferencial de produtos químicos dentro da matriz do solo através de zonas de adsorção-dessorção. A transferência de produtos químicos aplicados na superfície para a água de escoamento é também um componente importante.

O componente genérico de crescimento de culturas do modelo desempenha um papel importante na determinação das condições do sistema simulado. O sombreamento da copa das plantas reduz a evaporação do solo, enquanto a transpiração impulsiona a captação de água e nutrientes do solo pelas raízes das plantas. Descamações sazonais de material de folha e raízes mortas, juntamente com resíduos

de colheita proporcionam uma fonte de C e de N para as transformações na ciclagem de nutrientes do solo.

O sistema químico dentro da matriz do solo apresenta uma interação completa entre as transformações de nutrientes e o equilíbrio químico do solo. Estes dois processos caracterizam o pH do solo e estado químico do solo. Um sistema multicompartimental de carbono orgânico do solo (COS) constitui o núcleo do sistema de transformação de nutrientes. Populações de microrganismos respondem ao fornecimento de fontes de alimento, condições ambientais e restrições químicas. Concentrações de equilíbrio químico dos principais íons na solução do solo e no complexo de troca (CTC) são modificadas por alterações de umidade do solo, flutuações de temperatura, preparo e bioincorporação de resíduo de cultura e esterco.

A natureza de base física do modelo RZWQM exige do usuário uma boa quantidade de dados para parametrizar e inicializar adequadamente o modelo. Em geral, os usuários não têm dados suficientes para descrever completamente as condições de um sistema agrícola de produção. Assim, para facilitar o uso do modelo, o RZWQM permite opções de entrada de dados, onde certos parâmetros são estimados ou obtidos a partir de tabelas de valor padrão (default).

Inicialmente são calculados os efeitos do manejo (preparo de solo, adição de fertilizantes químicos ou orgânicos, defensivos químicos ou água de irrigação) sobre o sistema. Uma estimativa diária de evapotranspiração potencial é determinada e então os fluxos de evaporação e transpiração podem ser aplicados à superfície do solo e as raízes das plantas, respectivamente. Um ciclo de tempo de horas (o dia é subdividido para alguns cálculos) é então executado para calcular a água, a química e o transporte de calor e as trocas associadas. Os processos incluem infiltração e escoamento, distribuição de água no solo, transporte químico, perdas de pesticidas, o movimento de calor, a evaporação e transpiração real, absorção de N pela planta, a (re) consolidação do solo cultivado e dinâmica da neve acumulada.

Continuando ao longo do ciclo diário, pesticidas degradam na superfície das plantas e dos resíduos e dentro das camadas de solo. Os compartimentos de C e de N são transformados pelos processos de nutrientes. Os processos químicos do solo determinam pH e salinidade. Finalmente, depois de representadas todas as alterações físicas e químicas para o sistema ao longo do dia, os processos de crescimento de plantas determinam a produção vegetal.

O modelo RZWQM tem a capacidade de lidar com rotações de culturas, operações de preparo, irrigação e aplicações de fertilizantes, de pesticidas e de esterco (ROJAS e AHUJA, 1999). Plantio e a colheita são programados pelo usuário e os resíduos vegetais são devolvidos à superfície do solo, se for de interesse do usuário. A decomposição de resíduos na superfície é baseada no trabalho de Douglas e Rickman (1992). As operações de preparo modificam a densidade do solo e os compartimentos de resíduos (WILLIAMS et al., 1989). O preparo do solo e (re)consolidação do solo após o preparo são modelados pelo método de Linden e van Doren (1987). Efeitos de manejo nas propriedades hidráulicas do solo são estimados a partir de Ahuja et al. (1998b). A eficiência de aplicação de água, de esterco e de fertilizantes é 100%, enquanto que a eficiência de aplicação de pesticidas depende dos métodos de aplicação (WAUCHOPE et al., 1999).

Fertilizantes e esterco podem ser aplicados na superfície, incorporados, injetados ou fertirrigados. O RZWQM permite aplicações em diferentes épocas, bem como agendar automaticamente um evento com base no teor de N foliar. Água de irrigação pode ser aplicada por aspersão, inundação, ou métodos de gotejamento. Momento da irrigação pode ser definido por intervalos fixos, datas específicas ou ligado à depleção de água no solo. As culturas podem ser colhidas em um dia específico ou numa fase de crescimento específico. As opções de colheita incluem colheitas múltiplas ou simples de sementes, biomassa acima do solo ou raiz (ROJAS e AHUJA, 1999).

Em geral, o modelo é calibrado primeiramente para o balanço de água, em seguida para os compartimentos de matéria orgânica e microorganismos, e, por último, para o crescimento das plantas (HANSON et al, 1999; MAET al, 1998a). Os parâmetros do modelo que são difíceis de medir podem ser estimados pela calibração dos resultados de simulação em relação aos dados conhecidos. Nem todos os parâmetros são calibrados no RZWQM, sendo que a maioria dos parâmetros é medida, estimada, ou usa-se os valores padrões.

## **Modelos de simulação da emissão de gases de efeito estufa**

### **O modelo DAYCENT**

O modelo de ecossistema DAYCENT (PARTON et al, 1998; KELLY et al, 2000; DEL GROSSO et al, 2001) pertence à família CENTURY sendo, em linhas gerais, o modelo CENTURY acrescido de um submodelo de fluxo de gases com simulação em passo diário. Assim, o DAYCENT simula a troca de C, nutrientes (N, P e S) e gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{N}_2$ ) entre a atmosfera, solo e plantas. Dados de entrada necessários para executar o modelo incluem a precipitação e temperatura máxima/mínima diárias, as propriedades de solo específicas do local e uso das terras histórico e atual. Distúrbios e práticas de manejo tais como queimadas, pastejo, cultivo e as adições de matéria orgânica ou fertilizante podem ser simulados. O DAYCENT inclui submodelos para a produtividade da planta, decomposição de material vegetal morto e MOS, dinâmicas da água, solo e temperatura e fluxos de gases traços. Os fluxos de C e nutrientes são controlados pela quantidade de C nos vários compartimentos (por exemplo, MOS, e biomassa vegetal), as concentrações de N e de lignina dos compartimentos, fatores abióticos (temperatura/água do solo) e propriedades físicas do solo referentes à textura.

A MOS é dividida em três grupos com base nas taxas de decomposição (PARTON et al., 1993, 1994). A decomposição da MOS e adições de nutrientes externos suprem o compartimento de nutrientes que estão disponíveis para o crescimento das plantas e os processos microbiológicos que resultam em fluxos de gases traço. O crescimento das plantas é controlado por um parâmetro de crescimento máximo da planta-específica, a disponibilidade de nutrientes, e multiplicadores de 0-1 que refletem o sombreamento, água e stress de temperatura. A produtividade primária líquida é alocada entre os compartimentos madeira, folhas, grãos e raízes como uma função do tipo de planta, estação, conteúdo de água no solo e disponibilidade de nutrientes (METHERELL et al., 1994). O submodelo de superficial terrestre do DAYCENT simula o fluxo de água e evapotranspiração para o dossel de plantas, liteira (serapilheira) e o perfil do solo, bem como a temperatura do solo ao longo do perfil (PARTON et al, 1998; EITZINGER et al, 2000).

O submodelo de gases traço do DAYCENT simula o  $N_2O$  (óxido nitroso),  $NO_x$  (compostos de óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), que são produtos de processos de combustão), e as emissões de  $N_2$  (nitrogênio na forma molecular biatômica, gás inerte) a partir dos solos resultantes da nitrificação e desnitrificação, bem como oxidação  $CH_4$  (metano) em solos. O submodelo de nitrificação simula as emissões de  $N_2O$  e  $NO_x$  como uma função do  $NH_4^+$  do solo, conteúdo de água, temperatura, pH e textura. A nitrificação é limitada pelo stress de umidade do solo quando o espaço poroso ocupado por água é muito baixo e pela disponibilidade de  $O_2$  quando espaço poroso ocupado por água é demasiado elevado. O espaço poroso ocupado por água ótimo para a nitrificação é de 55%, mas para solos argilosos o espaço poroso ocupado por água ótimo é maior que para os solos arenosos. O submodelo desnitrificação simula as emissões de  $N_2O$ ,  $N_2$  e  $NO_x$  como uma função do  $NO_3^-$  do solo, conteúdo de água, disponibilidade de C lábil (a maioria dos microrganismos desnitrificadores é heterotrófica) e propriedades físicas do solo relacionadas com a textura que influencia as taxas de difusão de gases (DEL GROSSO et al., 2000b).

A desnitrificação, um processo anaeróbio, não ocorre até que o espaço poroso ocupado por água exceda 50-60%, em seguida, ela aumenta exponencialmente à medida que aumenta espaço poroso ocupado por água e o solo aproxima-se da saturação. Taxas de respiração heterotrófica simuladas são usadas como indicadores para disponibilidade de C lábil. As emissões de NO<sub>x</sub> são calculadas usando o total de N<sub>2</sub>O emitido, uma função NO<sub>x</sub>:N<sub>2</sub>O com base na difusividade do gás no solo e um multiplicador de picos com base na quantidade e na frequência de precipitação (PARTON et al, 2001). Como a difusividade do gás no solo diminui, uma proporção menor do fluxo total de gás nitrogenado é assumida como sendo na forma de NO<sub>x</sub> porque o NO<sub>x</sub> torna-se mais reativo a medida que o solo se torna mais reduzido. As equações de multiplicadores de picos foram desenvolvidas por Yienger e Levy (1995) e conta para as observadas altas taxas de emissões de NO<sub>x</sub> após eventos de precipitação em solos que estavam secos previamente (SMART et al, 1999; MARTIN et al, 1998; HUTCHINSON et al., 1993). A absorção de metano (CH<sub>4</sub>) é controlada pela difusividade do gás no solo, o conteúdo de água e da temperatura (DEL GROSSO et al., 2000c). As taxas de oxidação do CH<sub>4</sub> são limitadas pela difusividade do gás quando o conteúdo volumétrico de água do solo é muito alto e pelo estresse de umidade sobre a atividade biológica quando o conteúdo volumétrico de água do solo está muito baixo. Valores ótimos variam de 0,06-0,22 cm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O cm<sup>-3</sup> de solo. Tal como acontece com a nitrificação, solos argilosos são assumidos ter maior teor de água ótimo para a oxidação de CH<sub>4</sub> em relação aos solos arenosos.

## **Exemplos de aplicação de modelos de simulação de agroecossistemas em regiões tropicais**

A seguir estão alguns exemplos de como modelos de simulação têm sido utilizados para diferentes objetivos em vários sistemas de produção agrícola, com ênfase para estudos realizados em regiões tropicais e subtropicais, e inclusive no Brasil.

Probert et al. (1995) utilizaram os modelos CENTURY e APSIM para examinar os efeitos do preparo do solo, manejo da palha, e fertilizante nitrogenado sobre a produtividade de um sistema de cultura cereal de inverno/pousio de verão, na Austrália. Ambos os modelos previram que para este sistema com cultivo contínuo de cereais, haveria uma diminuição da matéria orgânica do solo e uma redução ao longo do tempo na capacidade do solo para mineralizar e acumular nitrato durante o pousio. Predições do APSIM evidenciaram erros no balanço hídrico de uma estação para a outra, de modo que em algumas estações, grandes erros ocorreram no rendimento relativo estimado. Ambos os modelos reproduziram as condições observadas bem o suficiente para serem considerados adequados para o estudo do comportamento dos sistemas de cultivo com ênfase na redução da fertilidade do solo.

Thornton et al. (1997) descreve como o modelo CERES-Millet foi usado em conjunto com um SIG e sensoriamento remoto para estimar a produção de milho sob estações contrastantes em 30 províncias de Burkina Faso, na África Ocidental. Pisani (1987) usou o modelo CERES-Maize para avaliar impactos da seca no milho em um estágio inicial do período seco para fornecer uma medida objetiva que os legisladores poderiam usar para declarar áreas como atingidas pela seca e, em seguida, implementar programas de subsídios de forma imparcial na África do Sul.

Beinroth et al. (1998) descrevem o desenvolvimento do AEGIS (Sistema de Informação Geográfica Agrícola e Ambiental) para uso com o DSSAT. Os autores usaram DSSAT+AEGIS para avaliar a viabilidade de

pequenos projetos de irrigação para bacias hidrográficas, nos Andes da Colômbia. Um modelo digital do terreno foi utilizado para classificar a paisagem dentro de uma bacia em três classes de declive e a irrigação foi assumida como sendo viável apenas onde o declive variou de 0 a 7%.

No Brasil, sob condições de clima subtropical, o modelo CENTURY têm sido associado à SIG para estimar estoques de carbono orgânico do solo (COS), considerando o tempo e o espaço, em nível de microbacias hidrográficas (LOPES et al., 2008; BORTOLON et al., 2011) e municípios (TORNQUIST et al., 2009) da região do Planalto gaúcho, que é a principal produtora de grãos do Rio Grande do Sul, visando a calibração e validação (BORTOLON et al., 2011 e 2012) deste modelo para avaliar os impactos do uso agrícola do solo sobre os estoques de COS e apresentou bons resultados. Entretanto, estudos de validação de modelos de simulação em nível de estados e regiões são ainda limitados no país. De modo geral, tais estudos indicaram, para esta região, que a remoção de florestas nativas seguida de 85 anos (1900-1985) de uso agrícola dos solos levou à redução dos estoques de COS em até 50% em relação ao original (sob mata nativa), devido principalmente ao manejo adotado no período de 1970-1985, com intenso revolvimento do solo pelo preparo convencional com aração e gradagens, baixa adição de resíduos pelos sistemas de culturas utilizados na época (soja/trigo) e queima de resíduos do trigo. Entretanto, estimativas para o ano de 2050 indicaram que a utilização de práticas conservacionistas de manejo de solo, como o plantio direto, associadas a sistemas de culturas que envolvam rotações mais complexas e que incluam o milho, têm grande potencial para recuperar as perdas históricas dos estoques de COS, podendo até, em muitos casos, superar os estoques encontrados sob vegetação nativa.

Estudos realizados nos biomas Amazônia, Cerrado e transição Pantanal-Cerrado, que compõem os trópicos brasileiros, também com o modelo CENTURY, apesar de não envolverem a etapa específica de validação, apresentaram resultados positivos. Por exemplo, Cerri et al. (2007) analisaram os efeitos advindos da conversão de floresta em pastagens

no C e N totais do solo, utilizando os modelos CENTURY e RothC, com os dados coletados na região oeste da Amazônia brasileira, onde estes modelos foram considerados adequados, porém com diferenças em suas estimativas. Carvalho (2009) estudando as mudanças nos estoques de COS na conversão de Cerrado para pastagem e sucessão de cultivos e a conversão de cultivos para a integração lavoura-pecuária (ILP), na região norte do Estado do Mato Grosso, comparou dados medidos com os estimados pelo modelo CENTURY. Neste estudo, sob condições de vegetação nativa, o modelo simulou de forma adequada os estoques de COS (estoque medido=56,3 Mg C ha<sup>-1</sup> e estimado=56,6 Mg C ha<sup>-1</sup>). No entanto, o modelo subestimou os estoques de COS quando simulou a conversão do Cerrado em pastagem, seguido de sucessão de cultivos (soja/milho) e posteriormente para ILP. Já Fernandes e Fernandes (2010) utilizaram o modelo CENTURY na simulação dos estoques de COS na camada 0-20 cm, sob vegetação nativa de cerrado e suas alterações pela substituição por pastagens cultivadas, no Pantanal Sul-Mato-Grossense. Neste estudo, embora represente um estudo de caso, os resultados estimados pelo modelo sugerem que, mantidas as condições de contorno, a introdução de pastagens cultivadas em áreas florestadas no Pantanal pode levar a uma perda contínua de COS ao longo do tempo, com implicações na sustentabilidade desse tipo de uso do solo, visto que a produção primária líquida do sistema é dependente dos nutrientes estocados na matéria orgânica do solo e de sua reciclagem. Assim, os autores salientam que simulações por modelos como o CENTURY podem ser úteis tanto para definir estratégias mais adequadas de uso e manejo do solo de forma a garantir a sustentabilidade da atividade, bem como prever os impactos sobre a dinâmica da MOS frente a cenários futuros quanto às mudanças climáticas e/ou outras alterações ambientais.

Resultados obtidos por Bowen et al. (1998) usando o modelo DSSAT para investigar a sustentabilidade em longo prazo de vários sistemas de cultivo no Brasil, indicaram que a sucessão contínua de milho/pousio sem adição de fertilizantes levou ao declínio gradual da produção de milho ao longo de 50 anos, enquanto que o sistema adubo-verde/

milho/pousio foi capaz de manter os rendimentos no mesmo período. No entanto, esta fonte de N do adubo-verde não era adequada para rendimentos máximos.

Dentro desta abordagem, há claramente uma necessidade de integrar e sintetizar o conhecimento de uma vasta gama de disciplinas na área científica e, neste sentido, modelos de simulação são ferramentas extremamente eficazes para ajudar a alcançar essa integração de conhecimentos. Mas para isso, os modelos precisam ser vistos como um encapsulamento dos conhecimentos obtidos a partir de muitos experimentos de campo e de laboratório realizados no passado, e uma maneira em que estes conhecimentos, de muitas disciplinas diferentes, podem ser integrados. Eles podem então ser usados para entender e prever o comportamento de sistemas de produção agrícola, sem a necessidade de repetir a mesma pesquisa mais uma vez em diferentes locais. Ao fazer isso, capitalizam-se os investimentos passados em pesquisa e agrega-se valor às despesas de pesquisas em andamento.

## **Potencial de uso de modelos de simulação em regiões de expansão agrícola no Brasil, com ênfase na agricultura de baixa emissão de carbono**

O Brasil assumiu o compromisso voluntário, previsto no artigo 12 da Lei que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC (Lei n.º 12.187, de 29 de dezembro de 2009), de reduzir as emissões de GEE entre 36,1% e 38,9% até 2020. Esta lei prevê, entre outras ações, que o Poder Executivo, em consonância com a PNMC, estabeleça planos de ação para a prevenção e controle de desmatamento nos biomas e planos setoriais de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas, cuja estratégia de implementação corresponde ao Plano ABC (Plano de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Através do Plano ABC o Brasil se compromete a reduzir em 80% a taxa de desmatamento

na Amazônia e em 40% no Cerrado, além de adotar, intensivamente na agricultura, a recuperação de pastagens degradadas, promover integração lavoura-pecuária-floresta, ampliar a adoção do sistema plantio direto e fixação biológica de nitrogênio.

A região conhecida como MATOPIBA, formada pelos estados Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (áreas sob o bioma Cerrado) tem sido considerada a última fronteira agrícola do país e encontra-se em franca ocupação. Dado este contexto de desenvolvimento do agronegócio no MATOPIBA e as condições de intensificação da conversão de áreas de Cerrado nativo para o uso do setor agropecuário, o que potencializa a contribuição desta região nas emissões de GEE, é de grande relevância estratégica incentivar arranjos produtivos favoráveis que assegurem a agricultura de baixa emissão de carbono, enquanto elevem simultaneamente a renda dos produtores, sobretudo com a expansão de melhores práticas de manejo. Portanto, a proposição e avaliação de cenários de manejo alternativos, considerando sistemas sustentáveis de produção agropecuária, onde são enfatizados a manutenção e o aumento dos estoques de COS, da qualidade do solo e da água, manejo adequado de nutrientes e sistemas de culturas de alta produtividade tem fundamental importância para o desenvolvimento regional.

Neste sentido, o uso de modelos de simulação de agroecossistemas pode representar um avanço nas pesquisas realizadas até o presente em condições tropicais, pois, conforme amplamente enfatizado ao longo desta revisão, os modelos são capazes de indicar as tendências futuras e estimar as medidas adequadas, tais como o uso de culturas apropriadas, variedades adaptadas e mudanças nas práticas de manejo de solo e de cultura, para minimizar os efeitos indesejados aos sistemas biológicos, ambientais ou socioeconômicos. Além disso, os modelos oferecem um meio fácil de ampliar a pesquisa para outros locais e, assim, minimizar a duplicação de pesquisa de campo, além de fornecerem um meio pronto para transferir o conhecimento integrado e tecnologia para os agricultores e outros usuários.

Outro fator importante em relação à áreas de fronteira agrícola, refere-se ao fato de que resultados experimentais são ainda limitados, especialmente em termos de avaliação de restrições e oportunidades para melhoria do uso dos recursos naturais e produtividade das culturas. Assim, os modelos de simulação adaptados para as condições locais podem ser usados para simular estratégias alternativas de manejo para avaliar os riscos em longo prazo, enquanto avaliações experimentais de estratégias condicionais e/ou alternativas não sejam possíveis, podendo ainda, se constituírem como uma ferramenta complementar em programas tradicionais de pesquisa agrônômica, possibilitando abordagens mais baratas e mais rápidas que permitam avaliar facilmente uma série de estratégias alternativas em termos de sua sustentabilidade.

Portanto, considerando as metas do Plano ABC a serem atingidas, e a complexidade dos sistemas agrícolas em questão, o incentivo a criação de grupos de pesquisa em modelagem e o desenvolvimento de linhas de pesquisa envolvendo a adaptação de modelos de simulação com potencial de uso em estudos de sistemas agrícolas voltados para a áreas de expansão agropecuária, como o MATOPIBA, bem como a proposição de projetos de pesquisa interdisciplinares e complementares que visem à busca de informações e índices de sustentabilidade destes sistemas, de forma a garantir a competitividade e sustentabilidade dos mesmos, com foco na agricultura da baixa emissão de carbono, deve ser entendida como uma visão estratégica para o Brasil (e para a Embrapa).

Por isso, as pesquisas a serem propostas deverão ser de longa duração e alto controle local, para propiciar o levantamento de dados confiáveis, imprescindíveis na elaboração de recomendações e para a calibração e validação de modelos de simulação voltados para sistemas sustentáveis de produção agropecuária.

## Considerações finais

Dentre os modelos de agroecossistemas apresentados no presente estudo, os que têm considerável potencial para auxiliar na avaliação de sistemas de produção com ênfase na agropecuária de baixa emissão de carbono (e no alcance das metas do Plano ABC) são: APSIM e DSSAT na modelagem do crescimento de culturas; o CENTURY e o DAYCENT no estudo da dinâmica da matéria orgânica do solo e gases de efeito estufa; o EPIC e o SWAT na modelagem hidrológica e avaliação dos impactos da erosão na qualidade do solo e da água. Cabe destacar que os modelos APSIM e DSSAT fazem parte do grupo de modelos do AgMIP que é um projeto global com a participação de grupos de modelagem de clima, agricultura e economia ao redor do mundo, para comparação e aprimoramento dos modelos, geração de cenários futuros e simulação do impacto das mudanças climáticas na agricultura e produção de alimentos. Todos estes modelos têm condições de serem utilizados como ferramentas em estudos realizados em nível de parcela experimental, propriedade rural, bacia hidrográfica ou mesmo para escalas regionais.

Embora estes modelos estejam longe de serem perfeitos e precisam ser testados localmente e aperfeiçoados mais profundamente ao longo do tempo e do espaço, eles poderão contribuir enormemente para o avanço da pesquisa voltada para o setor agrícola brasileiro, trazendo novos entendimentos aos sistemas de produção agropecuária e novas oportunidades para o agronegócio regional, tais como: a) aumento da competitividade e sustentabilidade dos sistemas de produção agropecuária; b) transferência de tecnologia; c) políticas públicas; d) serviços ambientais; e e) retroalimentação da pesquisa.

## Agradecimentos

Este estudo foi realizado com recursos de projetos financiados pela Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) coordenados pela primeira autora.

## Referências

- ADDISCOTT, T.M. Simulation modelling and soil behavior. **Geoderma**, Amsterdam, v. 60, n. 1, p. 15-40, 1993.
- AHUJA, L.R.; MA, L.; HANSON, J.D.; KANWAR, R.S. Application of the root zone water quality model for environment-water management in agricultural systems. In: PEREIRA, L.S.; GOWING, J.W. (Org.). **Water and the Environment: Innovative Issues in Irrigation and Drainage**. London, E&FN Sponsor, 1998. p. 3-11.
- AHUJA, L.R.; ROJAS, K.W.; HANSON, J.D.; SHAFFER, M.J.; MA, L. (Eds). **The Root Zone Water Quality Model**. Water Resources Publications LLC. Highlands Ranch, CO. 1999. 122 p.
- ANIMO, agricultural nitrogen model. 2012. Disponível em: <<http://www.animo.wur.nl/ANIMObibliography.htm>>. Acesso em 29 de fev. 2012.
- ARNOL, J.G., MUTTIAH, R.S.; SRINIVASAN, R.; ALLEN, P.M. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi Basin. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 227, n. 2, p.21-40, 2000.
- ARNOLD, J.G., R. SRINIVASAN, R.S. MUTTIAH, AND J.R. WILLIAMS. "Large Area Hydrologic Modeling and Assessment". Part I: Model Development. **Journal of American Water Resources Association**, Madison, v. 34, n. 1, p.73-89, 1998.
- ARNOLD, J.G., SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; ALLEN P.M.; WALKER, C. Continental scale simulation of the hydrologic balance. **Journal of American Water Resources Association**, Madison, v. 35, n. 5, p. 1037-1052, 1999.
- ARNOLD, J.G.; ALLEN, P.M. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 176, n. 2, p.57-77, 1996.

ASCH, F.; DINGKUHN, M.; WOPEREIS, M.C.S.; DÖRFFLING, K.; MIÉZAN, K. A conceptual model for sodium uptake and distribution in irrigated rice. In: KROPFF, M.J.; TENG, P.S.; AGGARWAL, P.K.; BOUMA, J.; BOUMAN, B.A.M.; JONES, J.W.; VAN LAAR, H.H. (Org). **Applications of Systems Approaches at the Field Level. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development**. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands. 1997. p.177-187.

ASSAD, E.D.; MARTINS, S.C. Agricultura de baixa emissão de carbono: A evolução de um paradigma. **Agroanalysis**, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 32-34, 2015.

BALZTER, H. Markov chain models for vegetation dynamics. **Ecological Modelling**, Amsterdam v. 126, n. 2 p. 139-154, 2000.

BANDINELLI, D.G. **Dinâmica e modelagem da vegetação campestre sob distúrbios**. 2008. 116p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

BEINROTH, F.H.; JONES, J.W.; KNAPP, E.B.; PAPAJORGJI, P.; LUYTEN, J. Evaluation of land resources using crop models and a GIS. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. Eds. **Understanding Options for Agricultural Production**. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development, Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands. 1998. p. 293-311.

BERGHUIJS VAN DIJK, J.T.; RIJTEMA, P.E.; ROEST, C.W.J. ANIMO agricultural nitrogen model. NOTA 1671, Institute for Land and Water Management Research, Wageningen, 1985. <http://www.animo.wur.nl/ANIMObibliography.htm>. Acesso em 29 de fev. 2012.

BOOTE, K.J.; JONES, J.W.; PICKERING, N.B. Potential uses and limitations of crop models. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 5, p. 704-716. 1996.

BORTOLON, E.S.O.; MIELNICZUK, J.; TORNQUIST, C.G.; LOPES, F.; BERGAMASCHI, H. Validation of the Century model to estimate

the impact of agriculture on soil organic carbon in Southern Brazil. **Geoderma**, Amsterdam v. 167, n. 6, p. 156-166, 2011.

BOWEN, W.T.; JONES, J.W.; CARSKY, R.J.; QUINTANA, J.O. Evaluation of the nitrogen submodel of CERES-Maize following legume green manure incorporation. **Agronomy Journal**, v. 85, n. 1, p.153-159, 1992.

BOWEN, W.T.; THORNTON, P.K.; HOOGENBOOM, G. The simulation of cropping sequences using DSSAT. In: TSUJI, G.Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P.K. (Org.). **Understanding Options for Agricultural Production. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development**. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands. 1998. p.313 –327.

CABELGUENNE, M., JONES, C.A., MARTY, J.R., DYKE, P.T., WILLIAMS J.R. Calibration and validation of EPIC for crop rotations in southern France. **Agricultural Systems**, v. 33, n. 2, p. 153-171. 1990.

CAO, W., BOWDEN, W.B. DAVIE, T., FENEMOR, A. Modelling impacts of land cover change on critical water resources in the Motueka River catchment, New Zealand. **Water Resource. Management**, Amsterdam, v. 23, n. 1, p. 137-151, 2008.

CARBERRY, I.S.; MUCHOW, R.C.; MCCOWN, R.L. Testing the CERES-Maize simulation model in a semi-arid tropical environment. **Field Crops Research**, v. 20, n. 2 p. 297-315, 1989.

CASTRIGNANO, A., KATERJI, N., KARAM, F., MASTRORILLI, M., AND HAMDY, A. A modified version of CERES-Maize model for predicting crop response to salinity stress. **Ecological Modelling**, v. 111, n. 2, p. 107–120, 1998.

CAVERO, J.; PLANT, R.E.; SHENNAN, C.; FRIEDMAN, D.B.; WILLIAMS, J.R.; KINIRY, J.R.; BENSON, V.W. Modeling nitrogen cycling in tomato-safflower and tomato-wheat rotations. **Agricultural Systems**, v. 60, n. 1, p. 123-135. 1999.

CEPUDER, P.; SHUKLA, M.K. Groundwater nitrate in Austria: A case study in Tullnerfeld. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 64, n. 2, p. 301-315. 2002.

CHUNG, S.W.; GASSMAN, P.W.; GU, R.; KANWAR, R.S. Evaluation of EPIC for assessing tile flow and nitrogen losses for alternative agricultural management systems. **Transactions ASAE**, v. 45, n. 4, p. 1135-1146. 2002.

COLEMAN, K.; JENKINSON, D.S. RothC-26.3. A model for the turnover of carbon in soil. In: POWLSON, D.S.; SMITH, P.; SMITH, J.U. **Org. Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets**. NATO ASI Series I, Heidelberg, 1996. p. 237-246

DEL GROSSO, S.J., PARTON, W.J., MOSIER, A.R., HARTMAN, M.D., BRENNER, J., OJIMA, D.S., SCHIMEL, D.S. Simulated interaction of carbon dynamics and nitrogen trace gas fluxes using the DAY-CENT model. In: SCHAFFER, M., MA, L., HANSEN, S. (Org.). **Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management**. CRC Press, Boca Raton, FL, 2001. p.303-332.

DEL GROSSO, S.J., PARTON, W.J., MOSIER, A.R., OJIMA, D.S., KULMALA, A.E., PHONGPAN, S. General model for N<sub>2</sub>O and N<sub>2</sub> gas emissions from soils due to denitrification. **Global Biogeochemical Cycles**. v. 14, n. 3, p. 1045–1060. 2000b.

DEL GROSSO, S.J., PARTON, W.J., MOSIER, A.R., OJIMA, D.S., POTTER, C.S., BORKEN, W., BRUMME, R., BUTTERBACH-BAHL, K., CRILL, P.M., DOBBIE, K., SMITH, K.A. General CH<sub>4</sub> oxidation model and comparisons of CH<sub>4</sub> oxidation in natural and managed systems. **Global Biogeochemical Cycles**. v. 14, n. 3, p. 999–1019. 2000c.

DOUGLAS, C.L.J.; RICKMAN, R.W. Estimating crop residue decomposition from air temperature, initial nitrogen content, and residue placement. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p.272- 278, 1992.

EITZINGER, J., PARTON, W.J., HARTMAN, M.D. Improvement and validation of a daily soil temperature submodel for freezing/thawing periods. **Soil Science**. v. 165, n.3 , p. 525–534. 2000.

FAO. A framework for land evaluation. FAO Soils Bulletin, No. 32. Food and Agriculture Organisation, Rome, Italy. 1976.

FENG, H.; KLING, C.L.; KURKALOVA, L.A.; SECCHI, S.; GASSMAN, P.W. The Conservation Reserve Program in the Presence of a Working Land Alternative: Implications for Environmental Quality, Program Participation, and Income Transfer. **American Journal of Agricultural Economy**, v. 87, n. 5, p. 1231-1238. 2005.

FENG, H.; KURKALOVA, L.A.; KLING, C.L.; GASSMAN P.W. Transfers and environmental co-benefits of carbon sequestration in agricultural soils: retiring agricultural land in the Upper Mississippi River Basin. **Climate Change**, v. 80, n. 1, p. 91-107. 2007.

FitzHUGH, T.W.; MACKAY, D.S. Impacts of input parameter spatial aggregation on an agricultural nonpoint source pollution model. **Journal of Hydrology**. v. 236, n, 2, p. 35-53, 2000.

GAISER, T.; STAHR, K.; BILLEN, N.; MOHAMMAD, M.A.R. Modeling carbon sequestration under zero tillage at the regional scale. I. The effect of soil erosion. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 218, n. 2, p. 110-120. 2008.

GASSMAN, P.W.; REYES, M.; GREEN, C.H.; ARNOLD, J.G. The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future directions. **Transactions of the ASABE**. v. 50, n. 4, p. 1211-1250, 2007.

GHEBREMICHAEL, L.T.; VEITH, T.L.; HAMLETT, J.M.; GBUREK, W.J. Precision feeding and forage management effects on phosphorus loss modeled at a watershed scale. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 63, n. 5, p. 280-291. 2008.

GIJSMAN, A.J.; HOOGENBOOM, G.; PARTON, W.J. Linking DSSAT and CENTURY for improved simulation of smallholder agricultural systems. In: DONATELLI, M.; STOCKLE, C.; VILLALOBOS, F.; MIR, J.M.V. (Org.) **Proceedings of the International Symposium on Modelling Cropping Systems**. 21-23 June 1999, Lleida, Spain, University of Lleida, Spain. 1999. p.189-190.

GIJSMAN, A.J.; OBERSON, A.; TIESSEN, H.; FRIESEN, D.K. Limited applicability of CENTURY model to highly weathered tropical soils. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 2, p. 894-903, 1996.

GOMES, A.G., VARRIALE, M.C. **Modelagem de ecossistemas: uma introdução**, UFSM, Santa Maria, 2nd ed. 503 p. 2004.

GOSAIN, A.K., RAO, S., BASURAY, D. Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basins. **Current Science Indian**, New Dehli, v. 90, n. 3, p. 346-353. 2006.

GREEN, C.H., TOMER, M.D., DI LUZIO, M., ARNOLD J.G. Hydrologic evaluation of the soil and water assessment tool for a large tile-drained watershed in Iowa. **Transactions of ASABE**, Denver, v. 49, n. 2, p. 413-422, 2006.

GREENLAND, D.J.; WILD, A.; ADAMS, D. Organic matter dynamics in soils of the tropics-from myth to complex to reality. In: LAL, R. (Org.) **Myths and science of soils of the tropics**. ASA/SSSA, Madison, 1992. p.17-33.

GREENWOOD, D.J.; KARPINETS, T. V. Dynamic model for the effects of K-fertilizer on crop growth, K-uptake and soil-K in arable cropping. 1. Description of the model. **Soil Use Management**, London, v. 13, n. 2, p. 178-183. 1997.

HAMMER, G.L.; WOODRUFF, D.R.; ROBINSON, J.B. Effects of climatic variability and possible climatic change on reliability of wheat cropping - a modelling approach. **Agricultural Forestry Meteorology**, Amsterdam, v. 41, n. 2, p.123-42, 1987.

HANSON, J.D.; ROJAS, K.W.; SHAFFER, M.J. Calibration and evaluation of the root zonewater quality model. **Agronomy Journal**, Madison, v. 91, n. 2, p.171-177, 1999.

HODGES, T.; JOHNSON, S.L.; JOHNSON, B. A modular structure for crop simulation models: implemented in the SIMPOTATO model. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, n. 2, p. 911-15, 1992.

HOOGENBOOM, G.; WHITE, J.W.; JONES, J.W.; BOOTE, K.J. BEAN-GRO: a process-oriented dry bean model with a versatile user interface. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, n. 6, p. 182-90, 1994.

HUTCHINSON, G.L., LIVINGSTON, G.P., BRAMS, E.A. Nitric and nitrous oxide evolution from managed subtropical grassland. In: OREMLAND, R.S. (Org.) **Biogeochemistry of Global Change: Radia-tively Active Trace Gases**. Chapman and Hall, New York, 1993. p. 290–316.

IPCC. XII. Summary for policymakers. In: HOUGHTON, J.T.; MEIRA-FILHO, L.G.; CHANCELLOR, B.A.; KATTENBERG, A.; MASKELL, K. (Org.). **Climate Change 1995: The Scientific Basis of Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1996, p. 572.

IZAURRALDE, R.C., WILLIAMS, J.R. MCGILL, W.B. ROSENBERG, N.J., QUIROGA JAKAS, M.C. Simulating soil C dynamics with EPIC: Model description and testing against long-term data. **Ecological Modelling**, v. 192, n. 4, p. 362-384. 2006.

JACKSON, L.E., STIVERS, L.J., WARDEN, B.T., TANJI K.K. Crop nitrogen utilization and soil nitrate loss in a lettuce field. **Fertilizer Research**, Amsterdam, v. 37, n. 2, p. 93-105. 1994.

JENKINSON, D.S.; ADAMS, D.E.; WILD, A. Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming. **Nature**, New York, v. 351, n. 1, p. 304-306, 1991.

JENKINSON, D.S.; COLEMAN, K.C. Calculating the annual input of organic matter to soil from measurements of total organic carbon

and radiocarbon. **European Journal of Soil Science**, London, v. 45, n. 3, p.167-174. 1994.

JENKINSON, D.S.; HARKNESS, D.D.; VANCE, E.D.; ADAMS, D.E.; HARRISON, A.F. Calculating net primary production and annual input of organic matter to soil from the amount and radiocarbon content of soil organic matter. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v. 24, n. 2, p. 295-308. 1992.

JHA, M.; ARNOLD, J.G.; GASSMAN, P.W. Water quality modeling for the Raccoon River Watershed using SWAT. **Transaction of ASAE**, Denver, v. 50, n. 2, p. 479-493. 2007.

JHA, M.; ARNOLD, J.G.; GASSMAN, P.W.; GIORGI, F.; GU, R. Climate change sensitivity of water yield in the Upper Mississippi River Basin. **Journal of American Water Resource Association**, Boston, v. 42, n. 4, p. 997-1015, 2006.

JHA, M.; GASSMAN, P.W.; SECCHI, S.; GU, R.; ARNOLD, J. Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment, and nutrient predictions. **Journal of American Water Resource Association**, Boston, v. 40, n. 3, p. 811-825, 2004a

JHA, M.; PAN, Z.; TAKLE, E.S.; GU, R. Impacts of climate change on streamflow in the Upper Mississippi River Basin: A regional climate model perspective. **Journal of Geophysics Research**, New York, v. 109, D09105, 2004b.

JONES, C.; SULTAN, M.; YAN, E.; MILEWSKI, A.; HUSSEIN, M.; AL-DOUSARI, A.; AL-KAISY, S.; BECKER R. Hydrologic impacts of engineering projects on the Tigris-Euphrates system and its marshlands. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 353, n. 3, p. 59-75. 2008.

JONES, C.A.; COLE, C.V.; SHARPLEY, A.N.; WILLIAMS, J.R. A simplified soil and plant phosphorus model. I. Documentation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 2 p. 800-805, 1984.

JONES, C.A.; DYKE, P.T.; WILLIAMS, J.R.; KINIRY, J.R.; BENSON V.W.; GRIGGS, R.H. EPIC: An Operational Model for Evaluation of Agricultural Sustainability. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 37, n. 2, p. 341-50. 1991.

JONES, C.A.; KINIRY, J.R. **Ceres-Maize: a simulation model of maize growth and development**. Texas A&M University Press, College Station, TX., 1986, 194p.

JONES, J. W. et al. Towards a New Generation of Agricultural System Models, Data, and Knowledge Products: State of Agricultural Systems Science. v1. p.9-63, 2015. AgMIP. Disponível em <<http://goo.gl/f4eV14>>.

KEATING, B.A.; CARBERRY, P.S.; HAMMER, G.L.; PROBERT, M.E.; ROBERTSON, M.J.; HOLZWORTH, D.; HUTH, N.I.; HARGREAVES, J.N.G.; MEINKE, H.; HOCHMAN, Z.; MCLEAN, G.; VERBURG, K.; SNOW, V.; DIMES, J.P.; SILBURN, M.; WANG, E.; BROWN, S.; BRISTOW, K.L.; ASSENG, S.; CHAPMAN, S.; MCCOWN, R.L.; FREEBAIRN, D.M.; SMITH, C.J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. **European Journal of Agronomy**, London, v. 18, n. 3, p. 267-288, 2003.

KEATING, B.A.; GODWIN, D.C.; WATIKI, J.M. Optimising nitrogen inputs in response to climatic risk. In: MUCHOW, R.C.; BELLAMY, J.A. (Org.). **Climatic Risk in Crop Production: Models and Management for the Semi-Arid Tropics and Subtropics**. CAB International, Wallingford, 1991. p.329-58.

KEATING, B.A.; MCCOWN, R.L.; WAFULA, B.M. Adjustment of nitrogen inputs in response to a seasonal forecast in a region of high climatic risk. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; TENG, P.; METSELAAR, K. (Org.). **Systems Approaches for Agricultural Development**. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands. 1993, p. 233-252.

KELLY, R.H.; PARTON, W.J.; CROCKER, G.J.; GRACE, P.R.; KLÍR, J.; KÖRSCHENS, M.; POULTON, P.R. e RICHTER, D.D. Simulating trends in

soil organic carbon in long-term experiments using the Century model. **Geoderma**, Amsterdam, v. 81, n. 2, p. :75-90, 1997.

KELLY, R.H., PARTON, W.J., HARTMAN, M.D., STRETCH, L.K., OJIMA, D.S., SCHIMEL, D.S. Intra and interannual variability of eco-system processes in shortgrass steppe. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, London, v. 105, n. 20, p. 93–100. 2000.

KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R.; GASSMAN, P.W.; DEBAEKE, P. A general process-oriented model for two competing plant species. **Transactions of ASABE**, Boston, v. 35, n. 3, p. 801-810, 1992.

LAMBIN, E.F. Modelling deforestation processes (A Review), Tropical ecosystem environment observations by satellites, TREES series B: Research Report n°1, EUR15744EN, p.45-101, 1994.

LEAL, M.A.A. **Proposta de modelo de simulação no estudo da dinâmica da matéria orgânica do solo**. Seropédica: UFRRJ, 1996. 111f. Dissertação (Mestrado – Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 1996.

LEAL, M.A.A.; DE-POLLI, H. Aplicação de modelos no estudo da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Org.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ª Ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008.

LEE, J.J, PHILLIPS, D.L, DODSON, R.F. Sensitivity of the US corn belt to climate change and elevated CO<sub>2</sub>: 2. Soil erosion and organic carbon. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 52, n. 4, p. 503-21. 1996.

LINDEN, D.R.; VAN DOREN, D.M.J. Simulation of interception, surface roughness, depression storage, and soil settling. In: SHAFFER, M.J.; LARSON, W.E. Eds. NTRM (Org.). **A Soil Crop Simulation Model for Nitrogen, Tillage, and Crop-Residue Management**. USDA-ARS, Conservation Research Report 34–1. p. 90-93, 1987.

LITTLEBOY, M.; SILBURN, D.M.; FREEBAIRN, D.M.; WOODRUFF, D.R.; HAMMER, G.L.; LESLIE, J.K. Impact of soil erosion on production in cropping systems. I. Development and validation of a simulation model. **Australian Journal of Soil Research**, Adelaide, v. 30, n. 2, p. 757-774, 1992.

LIU, J.; WILLIAMS, J.R.; ZEHNDER, A.J.B.; YANG, H. GEPIC – modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 94, n. 2, p. 478-493. 2007.

LOPES, F.; MERTEN, G.H.; MIELNICZUK, J.; TORNQUIST, C.G.; OLIVEIRA, E.S. Simulação da dinâmica do carbono do solo numa microbacia rural pelo modelo Century. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 3, p. 745-753, 2008.

LU, C.H.; VAN ITTERSUM, M.K.; RABBINGE, R. Quantitative assessment of resource-use efficient cropping systems: A case study for Ansai in the Loess Plateau of China. **European Journal of Agronomy**, London, v. 19, n. 2, p. 311-326. 2003.

MA, L.; SHAFFER, M.J.; BOYD, J.K.; WASKOM, R.; AHUJA, L.R.; ROJAS, K.W.; XU, C. Manure management in an irrigated silage corn field: Experiment and modeling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, n. 6, p. 1006-1017, 1998.

MARTIN, R.E.; SCHOLE, M.C.; MOSIER, A.R.; OJIMA, D.S.; HOLLAND, E.A.; PARTON, W.J. Controls on annual emissions of nitric oxide from soils of the Colorado shortgrass steppe. **Global Biogeochemical Cycles**, London, v. 12, n.1, 81-91. 1998.

MATTHEWS, R.; STEPHENS, W.; HESS, T.; MIDDLETON, T.; GRAVES, A. Applications of crop-soil simulation models in tropical agricultural systems. **Advances in Agronomy**, New York, v. 76, n. 1, 31-124, 2000.

MCCOWN, R.L.; WILLIAMS, J. AUSIM: A cropping systems model for operational research, Proc. SSA IMACS 1989 Biennial Conference on Modelling and Simulation, ANU. 25-27 Sept, 1989.

MCCOWN, R.L.; HAMMER, G.L.; HARGREAVES, J.N.G.; HOLZWORTH, D.P.; FREEBAIRN, D.M. APSIM: a Novel Software System for Model Development, Model Testing and Simulation in Agricultural Systems Research. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 50, n.2, p.255-271, 1994.

MEDEIROS, H.R. **Avaliação de modelos matemáticos desenvolvidos para auxiliar a tomada de decisão em sistemas de produção de ruminantes em pastagens**. 2003. 98f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiros, Piracicaba, 2003.

METHEREL, A. K.; HARVING, L. A.; COLE, C. V.; PARTON, W. J. **Century: soil organic matter model environment. technical documentation agrossystem version 4.0.**, Fort Collins: USDA-ARS, 1994. 123p. (Great Plains System Research Unit. Technical Report, 4).

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; SRINIVASAN, R.; WILLIAMS, J.R. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, version 2005**. Temple, TX: Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service. Available at: [www.brc.tamus.edu/swat/doc.html](http://www.brc.tamus.edu/swat/doc.html). 2005.

NELSON, R.G., ASCOUGH II, J.C., LANGEMEIER, M.R. Environmental and economic analysis of switchgrass production for water quality improvement in northeast Kansas. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 79, n. 4, p. 336-347. 2005.

ODUM, E.P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988. 433p.

ONSTAD, C.A.; FOSTER, G.R. Erosion modeling on a watershed. **Transactions of ASAE**, New York, v. 18, n. 2, p. 288-292. 1975.

PARAJULI, P.B.; MANKIN, K.R.; BARNES, P.L. Applicability of targeting vegetative filter strips to abate fecal bacteria and sediment yield using SWAT. **Agriculture Water Management**, v. 95, n. 6, p. 1189-1200. 2008.

PARSHOTAM, A. The Rothamsted soil-carbon turnover model--discrete to continuous form. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 86, n. 2, p. 283-289. 1995.

PARTON, W.J. The CENTURY model. In: Powlson, D.S., Smith, P., Smith, J.U. (Eds.). **Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing Long-Term Datasets**. NATO ASI Series I, Vol. 38, Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 283-293. 1996.

PARTON, W.J., HARTMAN, M.D., OJIMA, D.S., SCHIMEL, D.S. DAYCENT: its land surface submodel: description and testing. **Global Planetary Change**. v.19, n. 1, p. 35-48, 1998.

PARTON, W.J., HOLLAND, E.A., DEL GROSSO, S.J., HARTMAN, M.D., MARTIN, R.E., MOSIER, A.R., OJIMA, D.S., SCHIMEL, D.S. Generalized model for NO<sub>x</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from soils. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Amsterdam, v. 106, n. 12, p.17403-17419, 2001.

PARTON, W.J., RASMUSSEN, P.E. Long-term effects of crop management in wheat/fallow: II. CENTURY model simulations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 2, p. 530-536, 1994.

PARTON, W.J.; SCHIMEL, D.S.; COLE, C.V. e OJIMA, D.S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 5, n. 6, p. 1173-1179, 1987.

PARTON, W.J.; SCURLOCK, J.M.O.; OJIMA, D.S.; GILMANOV, T.G.; SCHOLES, R.J.; SCHIMEL, D.S.; KIRCHNER, T.; MENAUT, J.C.; SEASTEDT, T.; GARCIA MOYA, E.; KAMNLRUT, A.; KINYAMARIO, J.L. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. **Global Biogeochemical Cycles**, London, v. 7, n. 4, p. 785-809. 1993.

PARTON, W.J.; WOOMER, P.L.; MARTIN, A. Modelling soil organic matter dynamics and plant productivity in tropical ecosystems.

In: WOOMER, P.L.; SWIFT, M.J. (Eds). **The biological management of tropical soil fertility**. Chichester: John Wiley & Sons, p.171-188, 1994.

PAUSTIAN, K.; PARTON, W.J.; PERSSON, J.; Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen-fertilized long-term plots. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 4, p. 476-488, 1992.

PHILLIPS, D.L, HARDIN, P.D, BENSON, V.W, BAGLIO, J.V. Nonpoint-source pollution impacts of alternative agricultural management-practices in Illinois-a simulation study. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 48, n 5, p. 449-457, 1993.

PISANI, A.L.D. The CERES-Maize model as a potential tool for drought assessment in South Africa. **Water AS**, Auckland, v. 13, n. 3, p. 159-164. 1987.

PORTER, C.; JONES, J.W.; BRAGA, R. **An approach for modular crop model development**. **International Consortium for Agricultural Systems Applications**, Honolulu, HI, pp. 13, 2000. Available from <http://icasa.net/modular/index.html>.

POTTER, K.N., J.R. WILLIAMS, F.J. LARNEY, AND M.S. BULLOCK. Evaluation of EPIC's Wind Erosion Sub-model using Data from Southern Alberta. **Canadian Journal of Soil Science**, Ontario, v.78, n. 3, p.485-92, 1998.

POTTER, K.N.; WILLIAMS, J.R. Predicting Daily Mean Temperatures in the EPIC Simulation Model. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, n. 6, p. 1006-1011. 1994.

PROBERT, M.E.; DIMES, J.P.; KEATING, B.A.; DALAL, R.C.; STRONG, W.M. APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 56, n. 1, p. 1-28, 1998.

PROBERT, M.E.; KEATING, B.A.; THOMPSON, J.P.; PARTON, W.J. Modelling water, nitrogen and crop yield for a long-term fallow management experiment. **Australian Journal Experimental Agriculture**, Canberra, v. 35, n. 4, p. 941-950, 1995.

REUNGSANG, P.; KANWAR, R.S.; JHA, M.; GASSMAN, P.W.; AHMAD, K.; SALEH, A. Calibration and validation of SWAT for the Upper Maquoketa River watershed. **International Agricultural Engineering Journal**, New York, v. 169, n. 1-2, p. 35-48. 2007.

RIJTEMA, P.E.; KROES, J.G. Some results of nitrogen simulations with the model ANIMO. **Fertilizer Research**, Amsterdam, v. 27, n. 2, p. 189-198, 1991

ROJAS, K.W.; AHUJA, L.R. Management practices. In: AHUJA, L.R.; ROJAS, K.W.; HANSON, J.D.; SHAFFER, M.J.; MA, L. Eds. **The Root Zone Water Quality Model**, Water Resources Publications LLC, Highlands Ranch, CO. p. 245-280, 1999.

ROSENZWEIG, C. et al. The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 170, n. 1, p. 166-182. 2013.

RZWQM TEAM. RZWQM: Simulating the effects of management on water quality and crop production. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 57, n. 2, p. 161-195, 1998.

SALEH, A.; ARNOLD, J.G.; GASSMAN, P.W.; HAUCK, L.M.; ROSENTHAL, W.D.; WILLIAMS, J.R.; MCFARLAND, A.M.S. Application of SWAT for the Upper North Bosque River watershed. **Transactions of the ASAE**, New York, v. 43, n. 5, p.1 077-1087, 2000.

SANTHI, C., ARNOLD, J.G., WILLIAMS, J.R., DUGAS, W.A., SRINIVASAN, R., HAUCK, L.M. Validation of the SWAT Model on a large river basin with point and nonpoint sources. **Journal of American Water Resources Association**, New York, v. 37, n. 5, p. 1169-1188, 2001.

SCHIMEL, D.S., et al., Climatic, edaphic, and biotic controls over storage and turnover of carbon in soils, **Global Biogeochemistry Cycles**, v. 8, n. 3, p. 279-293, 1994.

SCHUOL, J.; ABBASPOUR, K.C.; YANG, H.; SRINIVASAN, R.; ZEHNDER, A.J.B. Modeling blue and green water availability in Africa. **Water Resources Research**, Amsterdam, v. 44 W07406, 2008b.

SCHUOL, J.; ABBASPOUR, K.C.; SRINIVASAN, R.; YANG, H. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 352, n. 1, p. 30-49. 2008a.

SECCHI, S.; GASSMAN, P.W.; JHA, M.; KURKALOVA, L.; FENG, H.H.; CAMPBELL, T.; KLING C.L. The cost of cleaner water: Assessing agricultural pollution reduction at the watershed scale. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 62, n. 1, p. 10-21. 2007.

SELIGMAN, N.G. The crop model record: promise or poor show? In: RABBINGE, R.; GOUDRIAAN, J.; VAN KEULEN, H.; PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H.H. Eds. **Theoretical Production Ecology: Reflection and Prospects. Simulation Monographs**. Pudoc, Wageningen, The Netherlands. pp. 249-263. 1990.

SELIGMAN, N.G.; VAN KEULEN, H. PAPRAN: A simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen. In: FRISSEL, M.J.; VAN VEEN, J.A. Eds. **Simulation of Nitrogen Behavior in Soil-Plant Systems**, PUDOC, Wageningen, The Netherlands. p.192–221. 1981.

SEWARD, P., BARRACLOUGH, P.B., GREGORY, P.J. Modelling potassium uptake by wheat (*Triticum aestivum*) crops. **Plant Soil**, Amsterdam, v. 124, n. 2, p. 303–307. 1990.

SHARPELY, A.N, WILLIAMS, J.R. EPIC, **erosion productivity impact calculator: 1. Model documentation**. Technical Bulletin, vol. 1768. Temple, TX: US Department of Agriculture; 1990.

SHEEHY, J.E., BERGERSEN, F.J., MINCHIN, F.R., WITTY, J. A simulation study of gaseous diffusion resistance, nodule pressure gradients and biological nitrogen fixation in soybean nodules. **Annals of Botany**, New York, v. 60, n. 3, p. 345-351. 1987.

SILBERBUSH, M., AND BARBER, S.A. Phosphorus and potassium uptake of field-grown soybean cultivars predicted by a simulation model. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 4, p. 592-596. 1984.

SINCLAIR, T.R.; SELIGMAN, N.A.G. Crop modelling: from infancy to maturity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 5, p. 698-703. 1996.

SINCLAIR, T.R.; SELIGMAN, N.G. Crop modelling: From infancy to maturity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 5, p. 698-703, 1996.

SMART, D.R.; STARK, J.M.; DIEGO, V. Resource limitation to nitric oxide emissions from a sagebrush-steppe ecosystem. **Bio-geochemistry**, Amsterdam, v. 47, n. 1, p. 63-86. 1999.

SMITH, P.; et al. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. **Geoderma**, Amsterdam, v. 81, n. 2, p. 153-225. 1997.

SPEDDING, C. R. W. Agricultural production systems. In: RABBINGE, R. GOUDRIAAN, J. VAN KEULEN, H. PENNING de VRIES, F. W. T. VAN LAAR, H. H. Eds. **Theoretical Production Ecology: Reflection and Prospects, Simulation Monographs**. Pudoc, Wageningen, The Netherlands. pp. 239-248. 1990.

SRINIVASAN, R., RAMANARAYANAN, T.S., ARNOLD, J.G., BEDNARZ, S.T. Large area hydrologic modeling and assessment, part II: Model application. **Journal of American Water Resources Association**, New York, n. 34, v. 1, p. 91-101. 1998.

SRIVASTAVA, P.; MIGLIACCIO, K.W.; ŠIMŮNEK, J. Landscape models for simulating water quality at point, field, and watershed scales. **Transactions of ASAE**, New York, n. 50, v. 5, p. 1683-1693. 2007.

STEHR, A.; DEBELS, P.; ROMERO, F.; ALCAYAGA, H. Hydrological modeling with SWAT under conditions of limited data availability: Evaluation of results from a Chilean case study. **Hydrology Science**, Amsterdam, v. 53, n. 3, p. 588-601. 2008.

STEYAERT, L. A Perspective on the State of Environmental Simulation Modeling. In: GOODCHILD, M.F. et al. (Eds). **Environmental Modeling with GIS**, 1993. p.16-30.

STOCKLE, C.O.; DYKE, P.T.; WILLIAMS, J.R.; JONES, C.A.; ROSENBERG, N.J. A Method for Estimating the Direct and Climatic Effects of Rising Atmospheric Carbon Dioxide on Growth and Yield of Crops. II. Sensitivity Analysis at Three Sites in the Midwestern USA. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 38, n. 3, p. 239-56. 1992a.

STOCKLE, C.O.; WILLIAMS, J.R.; JONES, C.A.; ROSENBERG, N.J. A Method for Estimating the Direct and Climatic Effects of Rising Atmospheric Carbon Dioxide on Growth and Yield of Crops. I. Modification of the EPIC Model for Climate Change Analysis. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 3, n. 2, p. 225-38. 1992b.

STONE, M.C.; HOTCHKISS, R.H.; HUBBARD, C.M.; FONTAINE, T.A.; MEARNS, L.O.; J.G. ARNOLD. Impacts of climate change on Missouri River Basin water yield. **Journal of American Water Resources Association**, New York, v. 37, n. 5, p. 1119-1130, 2001.

TAN, G.; SHIBASAKI, R. Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration. **Ecological Modelling**, v. 168, n. 3, p. 357-370. 2003.

TANJI, K.K. Economic implications of controls on nitrogen fertilizer use. In: STEVENSON, F.J. (Ed.) **Nitrogen in agricultural soils**. Madison: ASA/SSSA, 1982. P.721-772.

THOMSON, A.M., BROWN, R.A. ROSENBERG, N.J., IZAURRALDE, R.C, LEGLER, D.M., SRINIVASAN, R. Simulated impacts of El Nino/southern oscillation on United States water resources. **Journal of American Water Resources Association**, New York, v. 39, n. 1, p. 137-148. 2003.

THORNTON, P.K., BOWEN, W.T., RAVELO, A.C., WILKENS, P.W., FARMER, G., BROCK, J., BRINK, J.E., Estimating millet production for famine early warning: an application of crop simulation modelling using satellite and ground-based data in Burkina Faso. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 83, n. 1, p. 95-112. 1997.

TORNQUIST, C.G.; GASSMAN, P.W.; MIELNICZUK, J.; GIASSON, E.; CAMPBELL, T. Spatially explicit simulations of soil C dynamics in Southern Brazil: integrating Century and GIS with i-Century. *Geoderma*, Amsterdam, v. 150, n. 3, p. 404-414, 2009.

TSUJI, G.Y., UEHARA, G., BALAS, S. (Eds.), **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 3**. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii, 1994.

UEHARA, G.; TSUJI, G.Y. Progress in crop modelling in the IBSNAT Project. In: MUCHOW, R.C.; BELLAMY, J.A. (Eds.). **Climatic risk in crop production: Models and management in the semi-arid tropics and subtropics**. CAB International, Wallingford, p.143-156, 1991.

UNEP (1999). **Global Environmental Outlook 2000. UNEP's Millennium Report on the Environment**. Earthscan, London, UK.UNEP, 1999.

VAN KEULEN, H. Sustainability and long-term dynamics of soil organic matter and nutrientes under alternative management strategies. In: Bouma, J.; Kuyvenhoven, A.; Bouman, B.A.M.; Luten, J.C.; Zandstra, H.G. Eds. **Eco-regional Approaches for Sustainable Land Use and Food Production. Systems Approaches for Sustainable Agricultural Development**. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands. p. 353-375. 1995.

VOLK, M.; LIERSCH, S.; SCHMIDT, G. Towards the implementation of the European Water Framework Directive? Lessons learned from water quality simulations in an agricultural watershed. **Land Use Policy**, Amsterdam, v. 26, n. 3, p. 580-588, 2008.

WANG, X.; HARMEL, R.D.; WILLIAMS, J.R.; HARMAN, W.L. Evaluation of EPIC for assessing crop yield, runoff, sediment and nutrient losses from watersheds with poultry litter fertilization. **Transaction of ASABE**, New York, v. 49, n. 1, p. 47-59. 2006b.

WANG, X.; HE, X.; WILLIAMS, J.R.; IZAURRALDE, R.C.; ATWOOD, J.D. Sensitivity and uncertainty analyses of crop yields and soil organic carbon simulated with EPIC. **Transaction of ASABE**, New York, v. 48, n. 3, p. 1041-1054. 2005.

WANG, X.; YANG, W.; MELESSE, A.M. Using hydrologic equivalent wetland concept within SWAT to estimate streamflow in watersheds with numerous wetlands. **Transaction of ASABE**, New York, v. 51, n. 1, p. 55-72. 2008e.

WAUCHOPE, R.D.; NASH, R.G.; MCDOWELL, L.L.; ROJAS K.W.; AHUJA, L.R.; WILLIS, G.H.; MOORMAN, T.B.; MA, Q. Pesticide processes. In: AHUJA, L.R.; ROJAS, K.W.; HANSON, J.D.; SHAFFER, M.J.; MA, L. Eds. **The Root Zone Water Quality Model**. Water Resources Publications LLC, Highlands Ranch, CO, p.163-244, 1999.

WHITTEMORE, R.C. The BASINS Model. **Water Environment and Technology**, Amsterdam, v. 10, n. 1, p.57-61, 1998.

WILLIAMS, J.R. **Sediment yield prediction with universal equation using runoff energy factor**. US Department of Agriculture, (ARS-S-40). 1975.

WILLIAMS, J.R. The APEX manure management component. In: Saleh, A. Ed. **Proceedings of the Total Maximum Daily Load (TMDL) Environmental Regulations**. March 11-13, Forth Worth, TX,. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers, Chicago, v. 1, n. 1, p.44-51. 2002.

WILLIAMS, J.R. The EPIC Model. In: SINGH, V.P. (Ed.) **Computer Models of Watershed Hydrology**. Water Resources Publications, Highlands Ranch, USA, p.909–1000. 1995.

WILLIAMS, J.R. **The erosion-productivity impact calculator (EPIC) model: a case history**. USDA-ARS, p.421-427. 1990.

WILLIAMS, J.R., JONES, C.A., KINIRY, J.R., SPANEL, D.A. The EPIC crop growth model. **Transactions of ASAE**, New York, v. 32, n. 2, p. 497-511, 1989.

WILLIAMS, J.R.; HARMAN, W.L.; MAGRE, M.; KIZIL, U.; LINDLEY J.A.; PADMANABHAN, G.; WANG, E. APEX feedlot water quality simulation. **Transactions of ASAE**, New York, v. 49, n. 1, p. 61-73. 2006.

WILLIAMS, J.R.; IZAURRALDE, R.C. The APEX model. In: Singh, V.P.; Frevert, D.K. Eds. **Watershed Models**. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor e Francis. pp. 437-482.2006.

WILLIAMS, J.R.; IZAURRALDE, R.C.; STEGLICH, E.M. **Agricultural Policy/Environmental eXtender Model: Theoretical documentation version 0604** (Draft). BREC Report # 2008-17. Temple, TX: Texas AgriLIFE Research, Texas A&M University, Blackland Research and Extension Center. 2008.

WILLIAMS, J.R.; JONES, C.A.; DYKE, P.T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. **Transactions of ASAE**, New York, v. 27, n. 1, p. 129-144, 1984.

WILLIAMS, R.R.; JONES, C.A.; DYKE, P.T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. **Transactions of ASAE**, New York, v. 27, n. 1, p. 129-142, 1984.

WISCHMEIER, W.H, SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. In: **Agricultural Handbook**, vol. 537. Washing-ton, DC: USDA; p. 58, 1978.

WU, J.; BABCOCK, B.A. Metamodeling potential nitrate water pollution in the central United States. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 28, n. 6, p. 1916-1928. 1999.

WU, K.; JOHNSTON, C.A. Hydrologic comparison between a forested and a wetland/lake dominated watershed using SWAT. *Hydrological Processes*, Amsterdam, v. 22, n. 10, p. 1431-1442. 2007.

WU, W.; SHIBASAKI, R.; YANG, P.; TAN, G.; MATSUMURA, K-I.; SUGIMOTO, K. Global-scale modeling of future changes in sown areas of major crops. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 208, n. 2-4, p. 378-390. 2007.

YIENGER, J.J.; LEVY, H. Empirical model of global soil biogenic NOX emissions. **Journal of Geophysical Research**, Amsterdam, v. 100, n. 11, p. 447-464. 1995.







**Embrapa**

---

***Pesca e Aquicultura***

MINISTÉRIO DA  
**AGRICULTURA, PECUÁRIA  
E ABASTECIMENTO**



CGPE 13849