

Simulações de Práticas de Manejo na Produção de Cana-de-Açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas



**Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Tabuleiros Costeiros
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**

**BOLETIM DE PESQUISA
E DESENVOLVIMENTO
136**

**Simulações de Práticas de Manejo
na Produção de Cana-de-Açúcar nos
Tabuleiros Costeiros de Alagoas**

*Inácio de Barros
Peter J. Thorburn
Jody Scott Biggs
Ronaldo Souza Resende
Anderson Carlos Marafon*

**Embrapa Tabuleiros Costeiros
Aracaju, SE
2018**

Unidade responsável pelo conteúdo e edição:

Embrapa Tabuleiros Costeiros
Av. Beira Mar, 3250
CEP 49025-040, Aracaju, SE
Fone: (79) 4009-1300
www.embrapa.br
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
da Unidade Responsável

Presidente
Ronaldo Souza Resende

Secretário-Executivo
Marcus Aurélio Soares Cruz

Membros
Amaury da Silva dos Santos, Ana da Silva Lédo, Anderson Carlos Marafon, Joézio Luiz dos Anjos, Julio Roberto Araujo de Amorim, Lizz Kezzy de Moraes, Luciana Marques de Carvalho, Tânia Valeska Medeiros Dantas, Viviane Talamini

Supervisão editorial
Flaviana Barbosa Sales

Normalização bibliográfica
Josete Cunha Melo

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Aline Gonçalves Moura

Foto da capa
Maria Goreti Braga dos Santos

1ª edição
Publicação digitalizada (2018)

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 Tabuleiros Costeiros

Simulação de práticas de manejo na produção de cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas / Inácio de Barros... [et al.]. – Aracaju : Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2018. 32 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1678-1961; 136).

1. Modelagem agrônômica. 2. Cana-de-açúcar. 3. Modelagem computacional. 4. Manejo de palhada. I. Barros, Inacio de. II. Thorburn, Peter J. III. Biggs, Jody Scott. IV. Resende, Ronaldo Souza. V. Marafon, Anderson Carlos. VI. Série.

CDD 681.76 Ed. 21

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução.....	8
Material e Métodos	10
Resultados e Discussão	18
Conclusões.....	27
Agradecimentos.....	28
Referências	28

Simulações de Práticas de Manejo na Produção de Cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas

Inácio de Barros¹

Peter J. Thornburn²

Jody Scott Biggs³

Ronaldo Souza Resende⁴

Anderson Carlos Marafon⁵

Resumo – Os objetivos do trabalho foram parametrizar e validar o modelo Agricultural Production systems SIMulator (APSIM) para a simulação de sistemas de cultivo de cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros, e testar práticas de manejo por modelagem computacional a fim de gerar recomendação de manejo visando o aumento da eficiência no uso de recursos naturais e de insumos. A parametrização do modelo foi realizada por abordagem qualitativa, utilizando-se dados de clima, solo e manejo de três usinas. Os resultados demonstraram que o APSIM parametrizado simulou com acurácia a produção de cana e os diferentes manejos testados geraram recomendações técnicas. Para cana de ano irrigada, recomenda-se o plantio entre outubro e dezembro e a aplicação de 80 kg N ha⁻¹ a 160 kg N ha⁻¹, dependendo da taxa de retirada da palhada, a qual não deve superar 50%. Para o cultivo em sequeiro, recomenda-se o plantio em agosto, o uso de mucuna no

¹ Engenheiro Agrônomo, PhD em Ciências Agrárias, pesquisador da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, SE.

² Engenheiro Agrônomo, PhD em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador do Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Brisbane (QLD), Austrália.

³ Químico, pesquisador do Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Brisbane (QLD), Austrália.

⁴ Engenheiro Agrônomo, doutor em Irrigação e Drenagem, pesquisador da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, SE.

⁵ Engenheiro Agrônomo, doutor em Fisiologia Vegetal, pesquisador da Embrapa Tabuleiros Costeiros, Unidade de Pesquisa de Rio Largo (UEP-Rio Largo), Rio Largo, AL.

pousio, sem necessidade de adubação nitrogenada no plantio/renovação e 80 kg N ha⁻¹ a 120 kg N ha⁻¹ em cobertura, dependendo do manejo da palhada que não deve superar 25% de retirada. Em ambos os casos recomenda-se a colheita da cana crua.

Termos para indexação: *Saccharum officinarum*, APSIM, modelagem agrônômica, eficiência produtiva.

Simulations of Cropping Practices in Sugarcane Production in the Coastal Tablelands of Alagoas

Abstract – The objectives of this study were to parametrize and validate the Agricultural Production systems SIMulator (APSIM) crop model for simulating sugarcane production systems in Coastal Tablelands, and to test management practices so as to generate recommendations aiming at increasing the efficiency in the use of natural resources and inputs. Model parametrization was carried out by means of weather, soil and management data from three sugarcane mills using a qualitative approach. The results showed that, once parametrized, APSIM was able to simulate sugarcane yields in response to management accurately. The practices tested supported technical recommendations. For irrigated early-cane system, plantings should take place between October and December, using 80 kg N ha⁻¹ - 160 kg N ha⁻¹ depending on the rate of trash removal, which should not exceed 50%. For rainfed late-cane system, the best planting time is August, preceded by improved fallow with velvet beans. Using improved fallow, there is no need for N application in the year of planting/renovation of sugarcane field. In ratoons, 80 kg N ha⁻¹ - 120 kg N ha⁻¹ has to be applied, depending on the rate of trash removal that must not exceed 25%. In both systems, green-cane harvesting is recommended.

Index terms: *Saccharum officinarum*, APSIM, crop modelling, production efficiency.

Introdução

Já na década de 90 a modelagem agrícola deixou de ser um exercício matemático baseado em conhecimentos ecológicos fundamentais e passou a ser um exercício ecológico usando a matemática e a ciência computacional. Essa transformação, dirigida à interpretação de uma situação ou problema real em um modelo matemático e sua resolução analítica constitui uma eficiente ferramenta para fazer previsões, tomar decisões, explicar e entender os fenômenos biofísicos mais profundamente. Assim, as abordagens *in silico*, baseadas no estudo de uma ampla gama de sistemas possíveis através da modelagem e simulação, oferece a possibilidade de identificar rapidamente novas estratégias de manejo capazes de satisfazer a condicionantes sociais, políticos e ambientais para uma produção sustentável (Loyce; Wéry, 2006; Le Gal et al., 2010), sendo ferramentas importantes no suporte ao desenvolvimento de sistemas de produção (Holzworth et al., 2014; 2015).

Em um contexto mundial onde se aponta que um dos impactos da busca por fontes alternativas de energia é a competição pelo uso da terra entre a produção de alimento e de energia (Harvey; Pilgrim, 2011), a modelagem se torna uma ferramenta indispensável para melhorar a eficiência na produção de cana-de-açúcar e reduzir a pressão por expansão de área de produção.

No Brasil, a modelagem agrônômica para cana-de-açúcar não condiz com a histórica importância social e econômica da cultura, e carece de estudos que permitam a obtenção de modelos confiáveis para suporte ao desenvolvimento de sistemas de produção mais eficientes e avaliação de impactos.

Parte das informações necessárias para a quantificação do desempenho dos sistemas sucroenergéticos pode ser obtida por meio de modelos de simulação. Para cana-de-açúcar, o APSIM (Thorburn et al., 2005) e o Decision Support System for Agrotechnology Transfer - DSSAT/CANEGRO (Singels et al., 2008) são os mais amplamente utilizados, sendo que, no Brasil, Nassif et al. (2012), Marin e Jones (2014) e Marin et al. (2011; 2013), parametrizaram e avaliaram o modelo DSSAT/CANEGRO, porém, apenas para as condições da região Sudeste. No caso da região Nordeste, tentativas nesse sentido ainda não se concretizaram e a adequação destes modelos representa um grande avanço, possibilitando a otimização dos processos

e a avaliação da eficiência no uso de recursos naturais pelos sistemas de produção.

Resta, ainda, a adaptação dos modelos para capacitá-los à simulação de produtividades reais de cana-de-açúcar. Nesses casos, as limitações envolvem também os aspectos nutricionais (Thorburn et al., 2005), hídricos e fitossanitários, e o processo de transição da modelagem em nível de produção potencial para níveis de produções reais é um dos principais objetos de pesquisa baseada em modelos agrônômicos no mundo (Booling et al., 2011).

Uma vez adaptados, calibrados e validados para as condições de clima e solo de uma região de interesse, os modelos de simulação tornam-se ferramentas poderosas e confiáveis no apoio ao desenvolvimento de sistemas de produção inovadores (Komarek et al., 2012), na assistência técnica rural (Oliver et al., 2012) e na avaliação do uso e da eficiência de recursos e insumos (Qureshi et al., 2013; Salazar et al., 2012).

No caso da cana-de-açúcar, o APSIM é, atualmente, o mais completo e bem testado modelo de simulação de sistemas de produção (Singels, 2014), sendo utilizado na previsão de produtividade (Everingham et al., 2007), na alocação de água (Everingham et al., 2008), no planejamento da irrigação (Inman-Bamber et al., 2005), na extrapolação de resultados experimentais (Inman-Bamber et al., 2004; Thorburn et al., 2002), na estimação da produtividade potencial (Marin et al., 2013), na avaliação do manejo dos resíduos culturais e nutrição mineral (Thorburn et al., 2000; Thorburn et al., 2001; Oliveira et al., 2015; Meier; Thorburn, 2016), entre outras aplicações. Muitas dessas tarefas não poderiam ter sido levadas a cabo sem o auxílio do modelo (Inman-Bamber et al., 2016)

Os objetivos deste trabalho foram o de parametrizar e validar o modelo de sistemas de produção agrícola APSIM (Agricultural Production system SIMulator) para a simulação de práticas de manejo na cana-de-açúcar (épocas de plantio, irrigação, doses de N e remoção da palhada) nas condições de solo e clima dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas e, com o modelo validado, testar práticas de manejo visando o aumento da eficiência no uso de recursos naturais e de insumos, principalmente a água, os recursos do solo e a adubação nitrogenada.

Material e Métodos

Configuração do modelo

O modelo APSIM versão 7.9 (Holzworth et al., 2014), sob licença não comercial para pesquisa e desenvolvimento, foi selecionado para a simulação dos dados experimentais em virtude das suas habilidades em simular a produtividade de cana (Keating et al., 1999), a taxa de decomposição de resíduos culturais (Thorburn et al., 2001) e o balanço do N no solo (Thorburn et al., 2005) e o detalhamento do modelo é descrito em Holzworth et al. (2014). O modelo foi configurado com os seguintes módulos: N e C no solo - APSIM-SoilN (PROBERT et al., 1998); água do solo - APSIM-SoilWat (PROBERT et al., 1998); dinâmica de resíduos culturais - APSIM-SurfaceOrganicMatter (Thorburn et al., 2001) e desenvolvimento da cana-de-açúcar - APSIM-Sugar (KEATING et al., 1999). De acordo com Oliveira et al. (2015), esses módulos são unidimensionais e as simulações são executadas em intervalo de tempo diário, dirigidas por dados climáticos. Os dados meteorológicos diários foram obtidos a partir de estações meteorológicas do INMET localizadas em Coruripe e São Luiz do Quitunde, bem como de medições realizadas localmente nas parcelas experimentais das Usinas Coruripe, Seresta e Santo Antônio.

A dinâmica de água, N, C e raízes são simuladas para cada camada de solo, e a água juntamente com nitrato associado move-se entre as camadas do perfil seguindo o gradiente de fluxo. No módulo APSIM-SoilN, a mineralização e imobilização do N, bem como a nitrificação são simulados em cada camada do solo, assim como as perdas de N, seja por desnitrificação ou lixiviação, sendo que a temperatura e a umidade do solo afetam todos os processos relacionados à dinâmica do N. O APSIM-SoilWat utiliza-se do modelo de balanço de água tipo *cascading bucket* para cada camada do solo. A presença de resíduos afeta a percolação, a infiltração e a evaporação de água do solo e sua dinâmica (taxa de decomposição, mineralização do N e cobertura do solo) e é simulada pelo módulo APSIM-SurfaceOrganicMatter. O módulo de cultura (APSIM-Sugar) usa a interceptação da radiação para simular a produção de fotoassimilados que são subsequentemente particionados para folhas, colmos, ponteiros, raízes e açúcar. A taxa de produção diária

de assimilados depende da radiação, temperatura e da disponibilidade de N e água. As operações de cultivo (preparo do solo, plantio, adubação, irrigação, colheita, incorporação de restos culturais e queima da palhada) foram detalhadas no módulo APSIM-Manager, onde foi considerado o plantio de 15 gemas por metro linear, a irrigação aplicada em gotejamento subsuperficial a 25 cm de profundidade e a ureia aplicada no fundo do sulco de plantio, também a 25 cm de profundidade.

Parametrização do modelo

Inicialmente, as informações e dados necessários para a os processos de parametrização do modelo APSIM e subsequente simulações de alternativas de manejo foram coletadas e armazenadas em uma base de dados e incluíram:

- a) Coleta e registro de dados de solo e clima da região junto às bases de dados oficiais da Embrapa, SEMARH-SE, INMET e UFAL.
- b) Coleta e registro de práticas de manejo e caracterização dos sistemas de produção por meio da literatura especializada e de consultas a especialistas e pesquisadores.
- c) Coleta e compilação de resultados experimentais disponíveis, os quais foram utilizados na parametrização do APSIM e que visavam avaliar, para as condições de solo e clima dos Tabuleiros Costeiros:
 - a eficiência no uso de água em plantio de verão de cana-de-açúcar sob irrigação; e
 - o desempenho agrônomo da ureia como fonte de nitrogênio para a cana-de-açúcar cultivada em sequeiro.

Os dados experimentais relativos à eficiência no uso da água advieram de um experimento que teve por objetivo avaliar diferentes épocas de plantio em cultivo irrigado de cana-de-açúcar visando definir o período que resulta em um maior aproveitamento da água proveniente da precipitação, bem como maiores produtividades e eficiência do uso de água. O experimento foi conduzido em área pertencente à Usina Coruripe de açúcar e álcool, localizada no município de Coruripe. Nele, foram testadas cinco datas de plantio (15 de outubro, 15 de novembro, 15 de dezembro, 15 de janeiro e 15 de fevereiro),

e a necessidade de irrigação calculada de forma a repor a evapotranspiração da cultura. Foram realizadas três colheitas correspondendo à cana-planta e duas colheitas correspondendo à cana-soca. O sistema de cultivo foi o de cana de ano, onde as colheitas são realizadas em períodos iguais de 365 dias e foram conduzidos no período de 2012 a 2016. Os detalhes do trabalho podem ser encontrados em Meneses e Resende (2016).

Já os dados experimentais sobre o uso da ureia como fonte de N para a cana-de-açúcar foram provenientes de um projeto que teve por objetivo avaliar o efeito de doses crescentes de nitrogênio na produção da cana-planta e cana-soca em cultivos sem irrigação sob Argissolos e em dois locais: a Usina Seresta, no município de Teotônio Vilela e a Usina Santo Antônio, no município de São Luís do Quitunde, ambos em Alagoas. Os experimentos foram conduzidos nos anos de 2014 a 2016 e foram testadas as seguintes doses de ureia: 0 kg N ha⁻¹, 40 kg N ha⁻¹, 80 kg N ha⁻¹ e 160 kg N ha⁻¹, sendo aplicados 50% da dose no momento de plantio e os outros 50 % após 40 dias. Ainda no plantio, foram também aplicados 120 kg K₂O ha⁻¹ na forma de cloreto de potássio e 100 kg P₂O₅ ha⁻¹ na forma de superfosfato triplo. Em ambos os locais foi realizada a calagem com 2 t ha⁻¹ de calcário dolomítico 60 dias antes do plantio, o que se deu em 17 de outubro de 2014 na Usina Seresta e em 20 de agosto de 2014 na Usina Santo Antônio. Na Usina Seresta, a cana foi colhida crua (corte mecanizado) 13 meses após o plantio no primeiro corte e o segundo corte se deu após 12 meses do primeiro. Na Usina Santo Antônio, a colheita foi realizada com a cana queimada (corte manual) 14 meses após o plantio no primeiro corte e o segundo corte ocorreu 10 meses após o primeiro. Em ambos os experimentos a produtividade de colmos foi registrada e utilizada para a parametrização do modelo.

Os dados de solo utilizados nas simulações foram obtidos através de análises físicas e químicas coletadas durante a execução dos experimentos de campo, sendo que os teores iniciais de N (NO₃⁻ e NH₄⁺) foram estimados por abordagem qualitativa, com base nos teores medidos de matéria orgânica do solo. Os parâmetros de entrada para o módulo APSIM-SoilWat, como a capacidade de campo, o ponto de murcha permanente e a umidade de saturação foram estimados em laboratório para o caso do experimento sobre a eficiência no uso de água. No caso dos experimentos sobre o desempenho agrônomo da ureia, esses parâmetros foram estimados por meio das funções de pedotransferência estabelecidas por Barros (2010).

Os parâmetros fisiológicos da cultura utilizados nas simulações foram os padrões estabelecidos para a variedade australiana Q117 (Keating et al., 1999). Esta variedade foi selecionada porque ainda não existem variedades de cana-de-açúcar brasileiras parametrizadas para o APSIM. A fisiologia desta variedade foi bastante estudada e ela foi extensivamente utilizada em simulações de sistemas de produção. Oliveira et al. (2015) utilizaram a Q117 em estudos de simulação dos efeitos de longo prazo do manejo da palhada na produção e na qualidade do solo em condições dos Tabuleiros Costeiros brasileiros, e demonstraram que a mesma foi capaz de reproduzir com grande acurácia a produção de cana e a dinâmica da matéria orgânica do solo nessas condições de solo e clima. Neste trabalho assumiu-se que se a produtividade da cana-de-açúcar puder ser reproduzida com elevado grau de precisão com esta variedade, informações úteis sobre o desempenho produtivo e ambiental em resposta a diferentes tratos culturais serão geradas.

Validação do modelo

A validação do modelo e a avaliação da sua capacidade preditiva foram realizadas por meio de comparações entre os resultados de produtividade obtidos nos experimentos de campo e aqueles gerados por meio das simulações com o modelo já parametrizado.

Testes estatísticos foram aplicados a fim de verificar a acurácia e a eficiência do modelo APSIM versão 7.9 em simular a produção de cana-de-açúcar nas condições parametrizadas dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. Esses testes incluíram:

- coeficiente de correlação (R);
- intercepto da regressão linear (a);
- inclinação da regressão linear (b);
- coeficiente de determinação (R^2);
- raiz do quadrado médio do erro (RMSE);
- raiz do quadrado médio do erro normalizada (NRMSE);
- eficiência do modelo (ME); e
- índice de concordância de Willmot (d).

Desenvolvimento in silico de sistemas de produção

Com o modelo APSIM já devidamente validado para simulações da produção de cana-de-açúcar nas condições de solo e clima dos Tabuleiros Costeiros, foram testados sistemas de cultivo de cana-de-açúcar que visaram aumentar a eficiência no uso de água e nitrogênio e na preservação do estoque de carbono do solo.

Para o teste in silico de alternativas de manejo da cultura, dois sistemas de produção, correspondentes aos dois principais tipos de cultivo de cana na região foram considerados: (a) cana de ano irrigada e (b) cana de ano e meio em regime de sequeiro.

a) Cana de ano irrigada

Para a cana de ano irrigada, o ambiente de cultivo considerado foi o de Coruripe, sendo que foram combinados os dados de solo coletados localmente, os dados da parametrização realizada e os dados de clima coletados tanto no âmbito do experimento quanto os dados históricos da estação meteorológica do INMET na região. Para as simulações foram usados os dados de clima do período de 2006 a 2016.

O experimento fatorial simulado contou com 480 tratamentos e dois ciclos de cultivos (10 anos), perfazendo-se 4800 simulações. Cada ciclo contou com uma cana planta e 4 soqueiras e as colheitas foram realizadas 365 dias após o plantio (ou última colheita), exceto para a quarta soca, em que a colheita ocorreu aos 355 dias após a última colheita. A colheita foi antecipada para permitir o preparo do solo. A irrigação foi interrompida 30 dias antes da colheita para favorecer a produção de açúcar e simular com maior acurácia a prática dos produtores.

Foram testados 3 fatores:

F1- data de plantio (12 níveis): no dia 15 de cada mês (de janeiro a dezembro).

F2- dose de nitrogênio (8 níveis): 0 kg N ha⁻¹, 40 kg N ha⁻¹, 80 kg N ha⁻¹, 120 kg N ha⁻¹, 160 kg N ha⁻¹, 200 kg N ha⁻¹, 240 kg N ha⁻¹ e 280 kg N ha⁻¹.

F3- taxa de remoção da palhada (5 níveis): 10%, 25%, 50%, 75% e 100%.

Uma taxa de remoção de 10% foi considerada como padrão para cana crua colhida mecanicamente e sem remoção da palhada, em virtude da eficiência do maquinário. Por sua vez, considerou-se que 75% da palhada é perdida quando se realiza a colheita manual de cana queimada.

Os resultados de desempenho dos tratamentos foram avaliados por meio dos seguintes variáveis:

V1- produção de cana ($t\ ha^{-1}$).

V2- demanda de irrigação ($mm\ safra^{-1}$).

V3- eficiência no uso de irrigação ($kg\ cana\ mm^{-1}$ de água de irrigação).

V4- eficiência agrônômica do N ($kg\ cana\ kg^{-1}\ N\ aplicado$).

V5- perda de N por lixiviação ($kg\ N\ ha^{-1}$).

V6- variação do C no solo na camada de 0 cm-30 cm ($tons\ C\ ha^{-1}$).

Nas simulações foi considerada a utilização de 18 gemas por metro linear de sulco e um espaçamento entre sulcos de 1 m. Foi considerado um sulco de plantio com profundidade de 25 cm. A fonte de N utilizada foi a ureia, sendo que na cana-planta 1/3 da dose foi aplicada no fundo do sulco de plantio e os outros 2/3 aplicados em cobertura 60 dias após o plantio (DAP). Já para as canas-soca, a aplicação de N se deu em cobertura, sendo que metade da dose foi aplicada 30 dias após a colheita e outra metade 60 dias após a colheita. A irrigação foi realizada por gotejamento em subsuperfície (25 cm de profundidade) e ocorreu sempre que a fração da água disponível para a cultura na camada 0 cm-40 cm do solo atingiu valor inferior a 0,8, e o volume aplicado foi calculado automaticamente de forma a elevar a água disponível à capacidade de campo.

b) Cana de ano e meio em regime de sequeiro

Para a cana de ano em regime de sequeiro, o ambiente de cultivo considerado foi o de São Luiz do Quitunde, sendo que foram combinados os dados de solo coletados localmente, os dados da parametrização realizada e os dados de clima coletados tanto no âmbito do experimento quanto os dados históricos da estação meteorológica do INMET em São Luís do Quitunde. Para as simulações foram usados os dados de clima do período de 2003 a 2016.

O experimento fatorial simulado contou com 400 tratamentos e dois ciclos de cultivos (12 anos, 10 safras), perfazendo-se 4000 simulações. A cana planta foi colhida aos 540 dias após o plantio e foram consideradas 4 socas com duração de 365 dias cada, havendo um período de pousio de 180 dias entre a última colheita e a renovação do canavial.

Foram testados 4 fatores:

F1- data de plantio (5 níveis): no dia 15 de cada mês (de abril a agosto).

F2- dose de nitrogênio (8 níveis): 0 kg N ha⁻¹, 40 kg N ha⁻¹, 80 kg N ha⁻¹, 120 kg N ha⁻¹, 160 kg N ha⁻¹, 200 kg N ha⁻¹, 240 kg N ha⁻¹ e 280 kg N ha⁻¹.

F3- taxa de remoção da palhada (5 níveis): 10%, 25%, 50%, 75% e 100%.

F4- pousio melhorado com mucuna (*Mucuna pruriens*) (2 níveis): sim, não.

Uma taxa de remoção de 10% foi considerada como padrão para cana crua colhida mecanicamente e sem remoção da palhada, em virtude da eficiência do maquinário. Por sua vez, considerou-se que 75% da palhada é perdida quando se realiza a colheita manual de cana queimada.

Os resultados de desempenho dos tratamentos foram avaliados por meio dos seguintes variáveis:

V1- produção de cana (t ha⁻¹).

V2- eficiência no uso de água (kg cana mm⁻¹ ETc).

V3- eficiência agrônômica do N (kg cana/kg N aplicado).

V4- perda de N por lixiviação (kg N ha⁻¹).

V5- variação do C no solo na camada de 0-30 cm (tons C/ha).

Nas simulações foi considerada a utilização de 18 gemas por metro linear de sulco e um espaçamento entre sulcos de 1 m. Foi considerado um sulco de plantio com profundidade de 25 cm. A fonte de N utilizada foi a ureia, sendo que na cana-planta 1/3 da dose foi aplicada no fundo do sulco de plantio e os outros 2/3 aplicados em cobertura 60 dias após o plantio (DAP). Já para as canas-soca, a aplicação de N se deu em cobertura, sendo que metade da dose foi aplicada 30 dias após a colheita e outra metade 60 dias após a colheita. Nas simulações onde o uso de pousio melhorado foi utilizado, a mucuna foi instalada apenas no início do experimento e no momento da renovação

do canavial, sendo que a mesma foi semeada 4 meses antes do plantio da cana. A densidade de semeadura da mucuna foi de 16 plantas m², semeadas a 5 cm de profundidade.

Tabela 1. Valores utilizados nas simulações após parametrização do modelo APSIM 7.9

	Localidades		
	Coruripe ¹	Teotônio Vilela ²	São Luiz do Quitunde ³
Textura do solo (horizonte A)	Areia franca	Franco-arenosa	Franco-arenosa
Textura do solo (horizonte Bt)	Argilo-arenosa	Argilosa	Argilosa
Precipitação média (mm ano ⁻¹)	1.179	1,134	1.657
Duração do experimento	2012-2016	2014-2016	2014-2016
C orgânico 0-20 cm (%)	0,96	1,22	1,22
C orgânico 20-40 cm (%)	0,59	0,92	0,92
Densidade aparente (g cm ⁻³)	1,44	1,46	1,46
Profundidade de raízes (m)	0,5	0,6	0,9
Capacidade de campo (mm mm ⁻¹)	0,144	0,252	0,278
Ponto de murcha (mm mm ⁻¹)	0,056	0,166	0,190

¹ – Cana de verão irrigada; ² – Cana de sequeiro colhida crua (corte mecânico);

³ – Cana de sequeiro colhida queimada (corte manual).

Resultados e Discussão

Parametrização e validação do modelo

Após o processo de parametrização pela abordagem qualitativa obteve-se o seguinte conjunto de parâmetros básicos para as simulações nas condições edafoclimáticas dos Tabuleiros Costeiros das regiões de interesse (tabela 1).

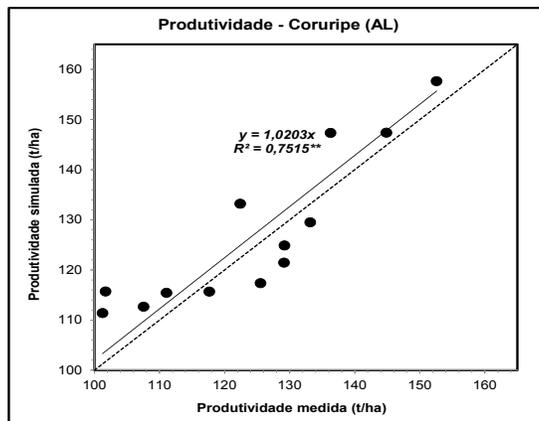


Figura 1. Validação do modelo APSIM para simulação da produção de cana-de-açúcar nas condições de solo e clima dos Tabuleiros Costeiros no município de Coruripe, AL, no período de 2012 a 2016. ** indica que o ajuste da equação é significativo pelo teste t ($p < 0,01$).

De posse dos parâmetros devidamente inseridos no modelo, bem como dos dados diários de clima e de manejo para os três sítios experimentais, as simulações geraram os resultados que foram utilizados para verificar a capacidade preditiva e validar o modelo. A Figura 1 apresenta a validação do modelo comparando-se os resultados obtidos em campo em diferentes épocas de plantio com aqueles gerados pelas simulações para as condições edafoclimáticas de Coruripe, AL.

Por sua vez, a comparação entre os resultados obtidos em campo e aqueles gerados pelas simulações com o APSIM versão 7.9 para os experimentos localizados em Teotônio Vilela e São Luiz do Quitunde, AL são apresentados na Figura 2.

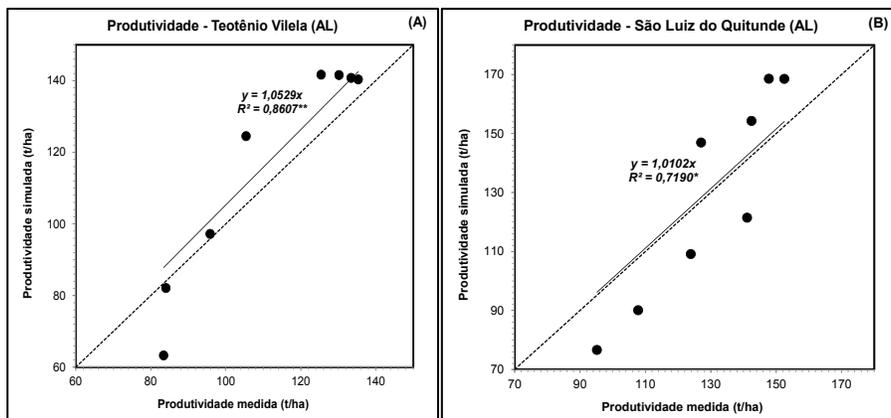


Figura 2. Validação do modelo APSIM para simulação da produção de cana-de-açúcar nas condições dos experimentos localizados nos municípios de: (A) Teotônio Vilela (cana crua); e (B) São Luiz do Quitunde (cana queimada) em Alagoas, no período de 2014 a 2016. ** indica que o ajuste da equação é significativo pelo teste t ($p < 0,01$) e * que o ajuste é significativo pelo teste t ($p < 0,05$)

A significância dos ajustes das equações lineares restritas ($y = a.x$) entre os valores de produtividade medidos e simulados, e os coeficientes angulares (a) que variaram de 1,01 a 1,05 nos três ambientes (Figuras 1 e 2) atestam para a boa capacidade preditiva do modelo após a parametrização realizada.

A validação do modelo pode ser confirmada pelas estatísticas apresentadas na Tabela 2, onde se observa que o APSIM versão 7.9 é capaz de simular com boa acurácia a produtividade da cana-de-açúcar nas condições dos Tabuleiros Costeiros nas regiões onde foi parametrizado.

Tabela 2. Estatísticas de validação do modelo APSIM versão 7.9 para simulações da produtividade de cana-de-açúcar nas condições dos Tabuleiros Costeiros.

	Localidades		
	Coruripe ¹	Teotônio Vilela ²	São Luiz do Quitunde ³
Coefficiente de correlação de Pearson (<i>R</i>)	0,885	0,952	0,915
Intercepto da regressão linear (<i>a</i>)	21,8	34,2	78,9
Inclinação da regressão linear (<i>b</i>)	0,8475	1,3499	1,6062
Coefficiente de determinação (<i>R</i> ²)	0,785	0,906	0,8366
Quadrado médio do erro (<i>RMSE</i>)	7,721	12,479	17,634
Quadrado médio do erro normalizado (<i>NRMSE</i>)	0,062	0,112	0,136
Eficiência do modelo (<i>ME</i>)	0,75	0,64	0,13
Índice de concordância (<i>d</i>)	0,93	0,94	0,88
Média observada (\bar{Y})	124,04	111,63	129,73
Média simulada (\hat{Y})	126,88	116,40	129,42

¹ – Cana de verão irrigada; ² – Cana de sequeiro colhida crua (corte mecânico);

³ – Cana de sequeiro colhida queimada (corte manual).

À exceção da ME das simulações realizadas em São Luiz do Quitunde, todas as outras estatísticas apresentadas na Tabela 2 atestam um elevado nível de acurácia das simulações e a validação do modelo. Observa-se ainda que os valores obtidos para as estatísticas das simulações realizadas em Coruripe são melhores do que as obtidas em Teotônio Vilela e em São Luiz do Quitunde, especialmente para o RMSE e o NRMSE. Esse resultado se deve principalmente ao fato de que os dados de solo e clima coletados no local do experimento em Coruripe foram mais completos do que aqueles coletados no âmbito dos experimentos conduzidos em Teotônio Vilela e São Luiz do Quitunde, o que favoreceu uma melhor parametrização do modelo para as condições desta localidade. Mesmo que o ME para as simulações de São Luiz do Quitunde seja inferior àquelas obtidas para os outros locais, o APSIM demonstrou-se adequado para simulações de práticas de manejo da cultura neste local, uma vez que todos os demais testes estatísticos atestaram para a acurácia do modelo.

Avaliação in silico de alternativas de manejo

Com a capacidade preditiva do modelo atestada e a sua validação confirmada por meio das estatísticas apresentadas acima, as diferentes alternativas de manejo propostas foram testadas por meio de simulações para os dois tipos de cultivo propostos.

Cana de ano irrigada

Os efeitos das diferentes épocas de plantio na produtividade de cana, na demanda de água para irrigação e na eficiência no uso de água da irrigação são apresentados na Figura 3.

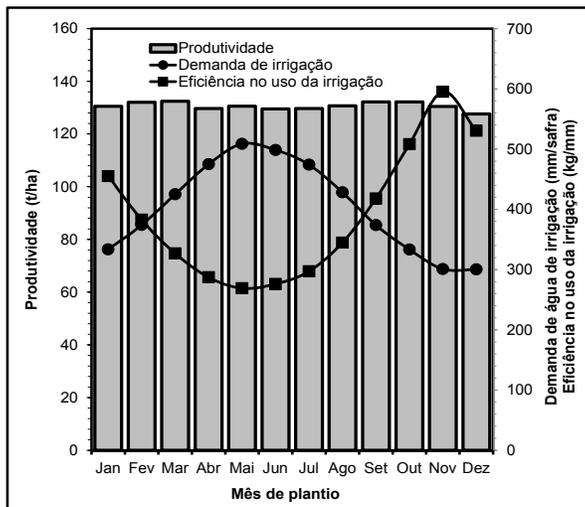


Figura 3. Efeito da época de plantio na produtividade de cana, na demanda de água para irrigação e na eficiência no uso de água da irrigação (média de 10 safras) em sistema de produção de cana de ano irrigada nas condições edafoclimáticas de Coruripe, simuladas com o modelo APSIM versão 7.9.

Não foram obtidas diferenças expressivas na produtividade de cana em função da época de plantio (Figura 3). Em Coruripe, as condições de temperatura e radiação, em geral, não são fatores limitantes ao desenvolvimento da cana-de-açúcar, sendo o déficit hídrico o principal fator determinante da produtividade dessa cultura. Tendo em vista que, nas simulações, a irrigação foi aplicada sempre que a fração da água disponível no solo atingiu patamar inferior a 0.8 da capacidade potencial na camada 0 cm - 40 cm, não houve

déficit hídrico independentemente da época de plantio. Por outro lado, a demanda de água de irrigação foi substancialmente maior no período de fevereiro a setembro (média de 450 mm) do que no período de outubro a janeiro (média de 315 mm), uma vez que a maior demanda de água pela cultura da cana-de-açúcar ocorreu durante o período seco (outubro a fevereiro). Em consequência, o período de plantio que favoreceu a uma maior eficiência no uso de água de irrigação se deu entre os meses de outubro a dezembro, que em média foi de 544 kg de cana mm^{-1} de água usada na irrigação contra apenas 277 kg mm^{-1} no período de abril a junho.

Na média das 10 safras, a resposta da cana-de-açúcar à aplicação do N seguiu um modelo não linear (Figura 4A) em que se pode observar que as doses de 120 kg N ha^{-1} a 160 kg N ha^{-1} foram as que mais favoreceram o desenvolvimento da cultura com baixas perdas do nutriente por lixiviação na forma de nitrato. Já a eficiência agrônômica do N aplicado seguiu um modelo quase linear e, as doses de 120 kg N ha^{-1} e 160 kg N ha^{-1} proporcionaram eficiências agrônômicas da ordem de 513 kg e 422 kg cana-de-açúcar por kg N aplicado, respectivamente (Figura 4B).

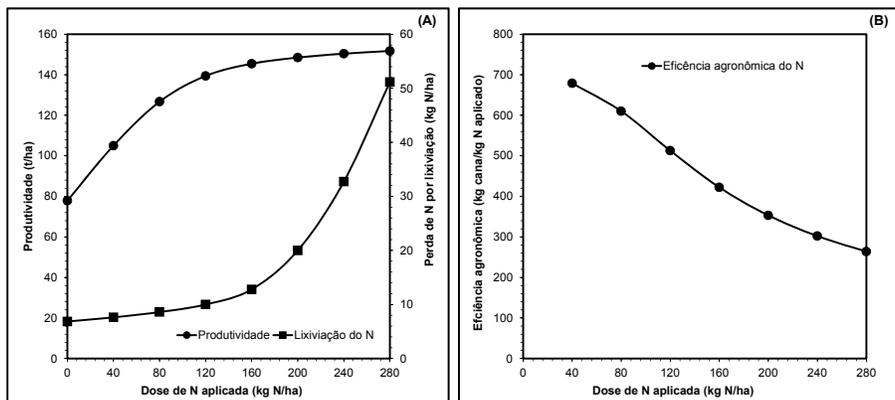


Figura 4. Efeito da dose de N aplicada na forma de ureia sobre (A) a produtividade de cana e perda de N por lixiviação; e (B) na eficiência agrônômica do N aplicado (média de 10 safras) em sistema de produção de cana de ano irrigada nas condições edafoclimáticas de Coruripe, simuladas com o modelo APSIM versão 7.9.

Não houve efeito expressivo do manejo da palhada na produtividade de cana-de-açúcar (Figura 5A). Todavia, a diminuição de cobertura morta com a remoção da palhada favoreceu ao aumento da evaporação da água do solo, o que se refletiu em uma maior demanda de água via irrigação (Figura 5A). Além disso, houve uma forte interação entre a taxa de remoção da palhada e a dose de N aplicada na variação do estoque de C do solo na camada de 0 cm-30 cm sendo que, quanto maior a remoção da palhada, maior a necessidade de N para a manutenção deste estoque (Figura 5B). No caso de remoções acima de 50% da palhada, há uma diminuição do C do solo após 10 anos de cultivo, independentemente da dose de N aplicada. Com retiradas de até 25% da palhada, a aplicação de 80 kg N ha⁻¹ é capaz de manter o estoque de C do solo estável, por sua vez, remoções de 50% da palhada requerem a aplicação de 150 kg N ha⁻¹ - 160 kg N ha⁻¹ para manutenção do C. Esse resultado também indica que o uso contínuo da colheita manual de cana queimada promove um empobrecimento do estoque de carbono no solo.

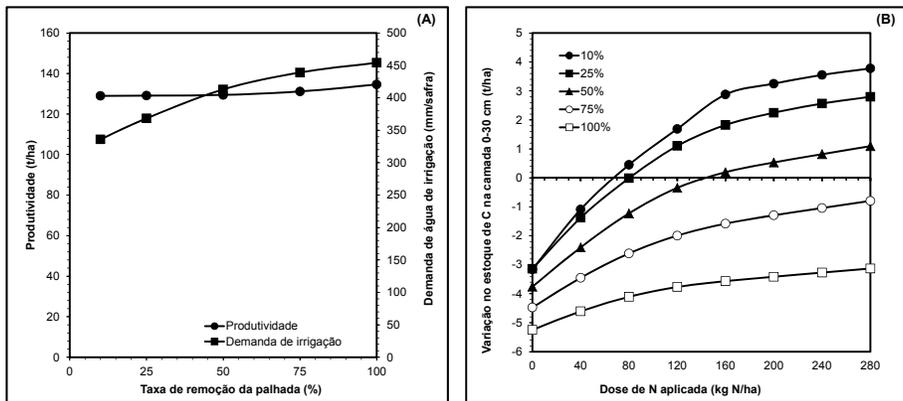


Figura 5. (A) Efeito da remoção da palhada na produtividade de cana e na demanda de água de irrigação (média de 10 safras); e (B) efeito combinado da remoção da palhada e da dose de N aplicada sobre a variação no estoque de C na camada de 0 cm-30 cm de solo após 10 safras em sistema de produção de cana de ano irrigada nas condições edafoclimáticas de Coruripe, simuladas com o modelo APSIM versão 7.9.

Cana de ano em regime de sequeiro

Os efeitos das diferentes épocas de plantio sobre a produtividade de cana e a eficiência no uso de água são apresentados na Figura 6.

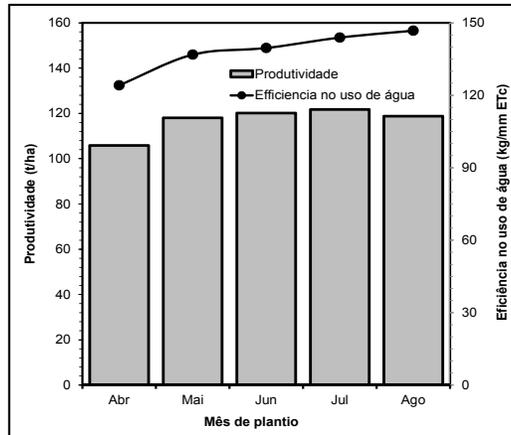


Figura 6. Efeito da época de plantio na produtividade de cana na eficiência no uso de água (média de 10 safras, 12 anos) em sistema de produção de cana de ano e meio em regime de sequeiro nas condições edafoclimáticas de São Luiz do Quitunde, simuladas com o modelo APSIM versão 7.9.

Na média de 10 safras (12 anos), a produtividade de cana foi ligeiramente superior quando o plantio ocorreu nos meses de maio a agosto em relação ao mês de abril. Todavia, há uma tendência linear da eficiência no uso de água, estimado como kg de cana produzida por mm de água evapotranspirado pela cultura, que favorece ao plantio no mês de agosto que apresentou uma eficiência 20% maior do que no plantio em abril.

Assim como para o cultivo de cana irrigada em Coruripe, a resposta da cana-de-açúcar à aplicação do N também seguiu um modelo não linear na média das 10 safras (Figura 7A). Como se pode observar, a dose de 80 kg N ha⁻¹ foi a que mais favoreceu o desenvolvimento da cultura com as baixas perdas do nutriente por lixiviação. Já a eficiência agrônômica do N aplicado apresentou queda acentuada entre as doses de 40 kg N ha⁻¹ e 120 kg N ha⁻¹. A dose de 80 kg N ha⁻¹ proporcionou uma eficiência agrônômica de 460 kg cana-de-açúcar por kg N aplicado (Figura 7B).

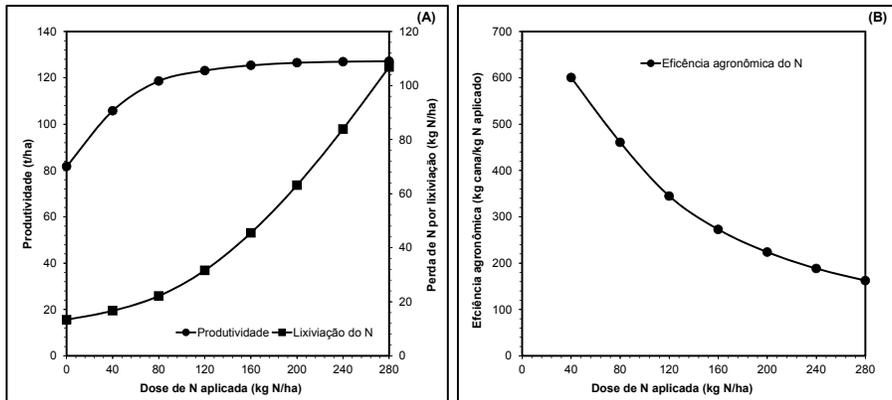


Figura 7. Efeito da dose de N aplicada na forma de ureia sobre (A) a produtividade de cana e perda de N por lixiviação; e (B) na eficiência agrônômica do N aplicado (média de 10 safras, 12 anos) em sistema de produção de cana de ano e meio em regime de sequeiro nas condições edafoclimáticas de São Luiz do Quitunde, simuladas com o modelo APSIM versão 7.9.

O manejo dos resíduos culturais apresentou um efeito expressivo sobre a produtividade de cana-de-açúcar cultivada em condições de sequeiro (Figura 8A). A diminuição da cobertura do solo com a remoção da palhada favoreceu a perda de água do solo por evaporação, reduzindo a disponibilidade de água para o processo produtivo de transpiração da cultura, o que se refletiu em uma forte diminuição na eficiência no uso de água pela cultura (Figura 8A). Além disso, a variação no estoque de C do solo na camada de 0 cm-30 cm, após 12 anos de cultivo (10 safras), dependeu da interação entre a taxa de remoção da palhada e a dose de N que foi aplicada. Sendo que, quanto maior a remoção da palhada, maior será a necessidade de N para se que mantenha estável o teor de C no solo (Figura 8B). No caso de remoções acima de 25% da palhada, independentemente da dose de N aplicada, há uma diminuição do C do solo após 12 anos de cultivo. Com retiradas de até 25% da palhada, a aplicação de 120 kg N ha⁻¹ é capaz de manter estável o estoque de C. Por sua vez, a aplicação de 80 kg N ha⁻¹ é suficiente para o estoque de C do solo se mantenha quando não há remoção da palhada, considerando-se 10% de perdas em virtude da eficiência da colheitadeira.

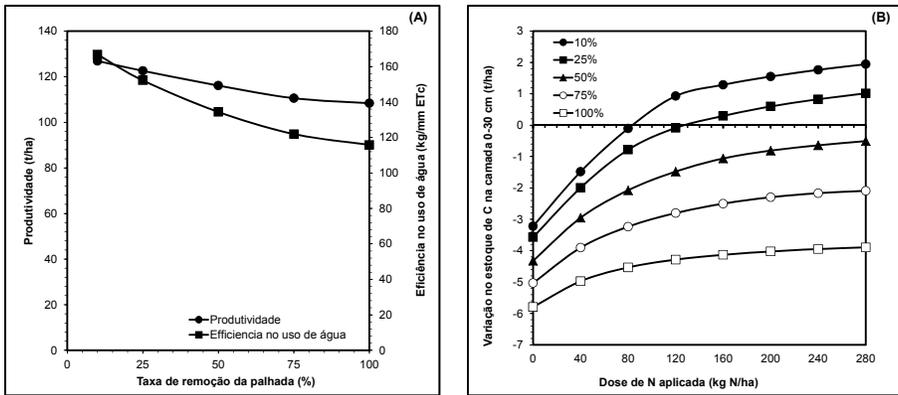


Figura 8. (A) Efeito da remoção da palhada na produtividade de cana e na eficiência no uso de água (média de 10 safras, 12 anos); e (B) Efeito combinado da remoção da palhada e da dose de N aplicada sobre a variação no estoque de C na camada de 0 cm-30 cm de solo após 12 anos de cultivo (10 safras) em sistema de produção de cana de ano de ano e meio em regime de sequeiro nas condições edafoclimáticas de São Luiz do Quitunde, simuladas com o modelo APSIM versão 7.9.

O uso de pousio melhorado com o cultivo de mucuna na renovação do canal apresentou um efeito benéfico na demanda de N nas primeiras colheitas de cana-de-açúcar sendo que não houve efeito da adubação nitrogenada na cana planta quando o pousio melhorado foi adotado (Figura 9A). Na segunda safra (primeira soca), a produtividade com dose de 80 kg N ha⁻¹ com o uso de mucuna equiparou-se àquela da dose de 120 kg N ha⁻¹ sem o uso do pousio melhorado (Figura 9B). Já na terceira colheita (segunda soca), não se observa mais o efeito do pousio melhorado na redução da adubação nitrogenada (Figura 9C). Além da redução da necessidade de adubação nitrogenada nas primeiras colheitas, o pousio melhorado com mucuna também favoreceu a manutenção do estoque de C na camada 0 cm - 30 cm do solo (Figura 9D), atestando para a eficiência ambiental desta prática.

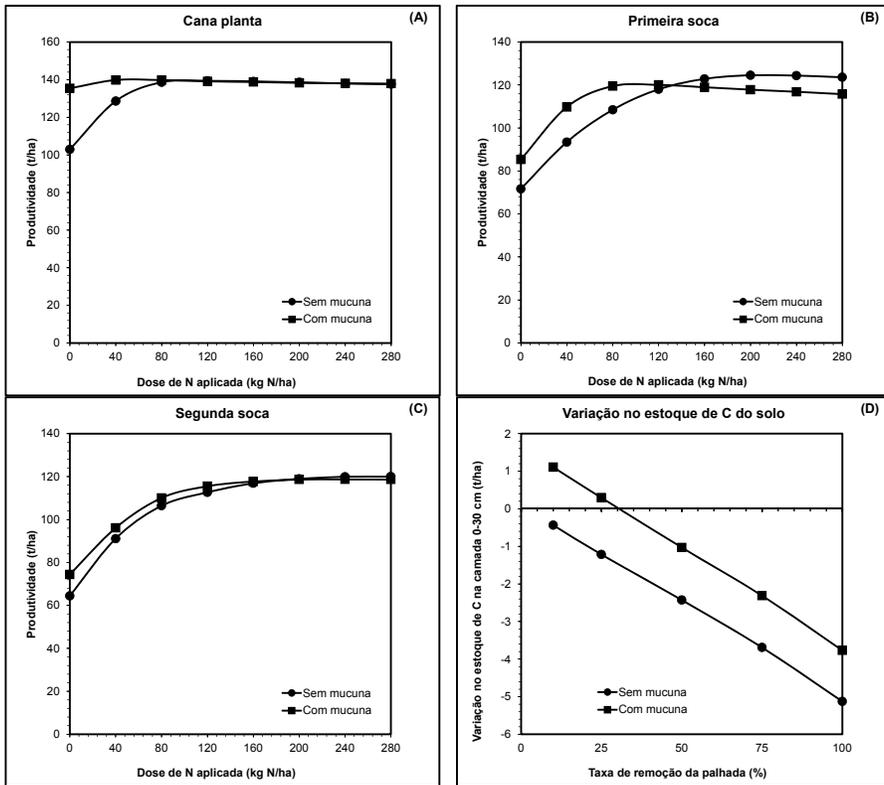


Figura 9. Efeito do uso de pousio melhorado com mucuna na resposta produtiva da cana a adubação com N na (A) cana planta, (B) primeira soca, (C) segunda soca; e (D) efeito combinado da remoção da palhada e do uso de mucuna sobre a variação no estoque de C na camada de 0 cm-30 cm de solo após 12 anos de cultivo (10 safras) em sistema de produção de cana de ano de ano e meio em regime de sequeiro nas condições edafoclimáticas de São Luiz do Quitunde, simuladas com o modelo APSIM versão 7.9.

Conclusões

Com base nos resultados obtidos neste estudo é possível concluir que:

- O modelo APSIM versão 7.9 devidamente parametrizado e validado é capaz de simular com acurácia a produção de cana-de-açúcar e suas respostas a variações no sistema de cultivo nas condições dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas.

- Para a maximização da eficiência produtiva e minimização dos impactos ambientais no cultivo de cana de ano irrigada, nas condições edafoclimáticas de Coruripe, AL, o plantio deve ocorrer entre os meses de outubro a dezembro, com a aplicação de 80 kg N ha⁻¹ a 120 kg N ha⁻¹ caso a remoção da palhada seja inferior a 25% ou de 120 kg N ha⁻¹ a 160 kg N ha⁻¹ caso a remoção da palhada para outros fins seja entre 25% e 50%, evitando-se a remoção de mais do que 50% da palhada bem como a queima da cana para colheita.

- No caso do sistema de cultivo de cana de ano e meio em regime de sequeiro nas condições edafoclimáticas de São Luiz do Quitunde, AL, a maximização da eficiência produtiva com a minimização dos impactos ambientais, ocorrem com o plantio da cana no mês de agosto, o uso de pousio melhorado com mucuna, sem a aplicação de adubação nitrogenada no plantio/reforma do canavial e a aplicação de 80 kg N ha⁻¹ em cobertura nas soqueiras caso não haja remoção da palhada. Não se deve remover mais do que 25% da palhada para não comprometer o estoque de C orgânico do solo e, neste caso, a adubação de cobertura necessita ser elevada a 120 kg N ha⁻¹. Deve-se também evitar a queima da cana para colheita.

Agradecimentos

Ao Department of Education and Training do governo da Austrália e ao programa de bolsas de pesquisas Endeavour pelo financiamento do projeto.

Ao Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) e ao Queensland Bioscience Precinct (QBP) pela acolhida durante a realização das atividades de simulação.

Referências

BARROS, A. H. C. **Desenvolvimento de funções de pedotransferência e sua utilização em modelo agro-hidrológico. 2010 148 f.** Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2010.

BOOLING, A. A.; BOUMAN, B. A. M.; TUONG, T. P.; KONBOON, D.; HARNPICHITVITAYA, D. Yield gap analysis and the effect of nitrogen and water on photoperiod-sensitive Jasmine rice in north-east Thailand. **Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 58, n. 1-2, p. 11-19, 2011.

EVERINGHAM, Y. L.; BAILLIE, C.; INMAN-BAMBER, N. G.; BAILLIE, J. Forecasting water allocations for Bundaberg sugarcane farmers. **Climate Research**, v. 36, n. 3, p. 231–239, 2008.

EVERINGHAM, Y. L.; INMAN-BAMBER, N. G.; THORBURN, P. J.; MCNEILL, T. J. A Bayesian modelling approach for long lead sugarcane yield forecasts for the Australian sugar industry. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 58, n. 2, p. 87–94, 2007.

HARVEY, M.; PILGRIM, S.. The new competition for land: Food, energy, and climate change. **Food Policy**, v. 36, n. 1, p. 40-51, 2011.

HOLZWORTH, D. P.; HUTH, N. I.; DEVOIL, P. G.; ZURCHER, E. J.; HERRMANN, N. I.; MCLEAN, G.; CHENU, K.; VAN OOSTEROM, E.; SNOW, V. O.; MURPHY, C.; MOORE, A. D.; BROWN, H. E.; WHISH, J. P. M.; VERRALL, S.; FAINGES, J.; BELL, L. W.; PEAKE, A. S.; POULTON, P. L.; HOCHMAN, Z.; THORBURN, P. J.; GAYDON, D. S.; DALGLIESH, N. P.; RODRIGUEZ, D.; COX, H.; CHAPMAN, S.; DOHERTY, A.; TEIXEIRA, E.; SHARP, J.; CICHOTA, R.; VOGELER, I.; LI, F. Y.; WANG, E.; HAMMER, G. L.; ROBERTSON, M. J.; DIMES, J.; WHITBREAD, A. M.; HUNT, J.; VAN REES, H.; MCCLELLAND, T.; CARBERRY, P. S.; HARGREAVES, J. N. G.; MACLEOD, N.; MCDONALD, C.; HARSDORF, J.; WEDGWOOD, S.; KEATING, B. A. APSIM-Evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling and Software**, v. 62, p. 327–350, 2014.

HOLZWORTH, D. P.; SNOW, V.; JANSSEN, S.; ATHANASIADIS, I. N.; DONATELLI, M.; HOOGENBOOM, G.; WHITE, J. W.; THORBURN, P. J. Agricultural production systems modelling and software: Current status and future prospects. **Environmental Modelling and Software**, v. 72, p. 276-286, 2015.

INMAN-BAMBER, N. G.; ATTARD, S. J.; BAILLIE, C.; LAWSON, D.; SIMPSON, L. A web-based system for planning use of limited irrigation water in sugarcane. **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists**, v. 27, p. 170–181, 2005.

- INMAN-BAMBER, N. G.; ATTARD, S. J.; SPILLMAN, M. F. Can lodging be controlled through irrigation? **Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists**, v. 26, p. 11 2004.CD-ROM.
- INMAN-BAMBER, N. G.; JACKSON, P. A.; STOKES, C. J.; SVERRALL, S.; LAKSHMANAN, P.; BASNAYAKE, J. Sugarcane for water-limited environments: Enhanced capability of the APSIM sugarcane model for assessing traits for transpiration efficiency and root water supply. **Field Crops Research**, v. 196, p. 112-123, 2016.
- KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. Modelling sugarcane production systems. I. Development and performance of the sugarcane module. **Field Crops Research**, v. 61, n. 3, p. 253–271, 1999.
- KOMAREK, A. M.; MCDONALD, C. K.; BELL, L. W.; WHISH, J. P. M.; ROBERTSON, M. J.; MACLEOD, N. D.; BELLOTTI, W. D. Whole-farm effects of livestock intensification in smallholder systems in Gansu, China. **Agricultural Systems**, v. 109, p. 16–24, 2012.
- LE GAL, P. Y.; MEROT, A.; MOULIN, C. H.; NAVARRETE, M.; WERY, J. A modelling framework to support farmers in designing agricultural production systems. **Environmental Modelling and Software**, v. 25, n. 2, p. 258-268, 2010.
- LOYCE, C.; WERY, J. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception des systèmes de culture. In: DORE, T.; LE BAIL, M.; MARTIN, P.; NEY, B.; ROGER-ESTRADE, J. (Ed.). **L'agronomie aujourd'hui**. Paris: Editions QUAE, 2006. p. 77–95.
- MARIN, F. R.; JONES, J. W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. **Scientia Agricola**, n. 71, p. 1-16, 2014.
- MARIN, F. R.; JONES, J. W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELLI, J. L. W. J. PALLONE F.; NASSIF, D. S. P. Parameterization and Evaluation of Predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian Sugarcane. **Agronomy Journal**, v. 103, n. 2, p. 304-311, 2011.
- MARIN, F. R.; JONES, J. W.; SINGELS, A.; ROYCE, F.; ASSAD, E. D.; PELLEGRINO, G.; JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. **Climatic Change**, v. 117, n. 1-2, p. 227-239, 2013.
- MEIER, E. A.; THORBURN, P. J. Long Term Sugarcane Crop Residue Retention Offers Limited Potential to Reduce Nitrogen Fertilizer Rates in Australian Wet Tropical Environments. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, art. 1017, 2016.
- MENESES, T. N.; RESENDE, R. S. Influência de épocas de plantio na eficiência do uso da água da chuva em cultivo irrigado de cana-de-açúcar. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 291-305.

NASSIF, D. S. P.; MARIN, F. R.; PALLONE FILHO, W. J.; RESENDE, R. S.; PELLEGRINO, G. Q. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 3, p. 311-318. 2012.

OLIVEIRA, A. P. P.; THORBURN, P. J.; BIGGS, J. S.; LIMA, E.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; ZANOTTI, N. E. The response of sugarcane to trash retention and nitrogen in the Brazilian coastal tablelands: a simulation study, **Experimental Agriculture**, v. 52, n. 1, p. 69–86, 2015.

OLIVER, D. M.; FISH, R. D.; WINTER, M.; HODGSON, C. J.; HEATHWAITE, A. L.; CHADWICK, D. L. Valuing local knowledge as a source of expert data: farmer engagement and the design of decision support systems. **Environmental Modelling and Software**, v. 36, p. 76–85, 2012.

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**, v. 56, n. 1, p. 1–28, 1998.

QURESHI, M. E.; WHITTEN, S. M.; MAINUDDIN, M.; MARVANEK, S.; ELMANDI, A. A biophysical and economic model of agriculture and water in the Murray-Darling Basin, Australia. **Environmental Modelling and Software**, v. 41, p. 98–106, 2013.

SALAZAR, M. R.; HOOK, J. E.; GARCIA Y GARCIA, A.; PAZ, J. O.; CHAVES, B.; HOOGENBOOM, G. Estimating irrigation water use for maize in the Southeastern USA: a modeling approach. **Agricultural Water Management**, v. 107, p. 104–111, 2012.

SINGELS, A. Crop models. In: MOORE, P. H.; BOTHA, F. C. (Ed.). **Sugarcane: physiology, biochemistry & functional biology**. Ames: John Wiley & Sons, 2014. p. 541–577.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DER BERG, M. **DSSAT v4.5- CANEGRO Sugarcane Plant Module: scientific documentation**. Mount Edgecombe: International Consortium for Sugarcane Modelling, 2008. 34 p.

THORBURN, P. J.; KEATING, B. A.; ROBERTSON, F. A.; WOOD, A.W. **Long-term changes in soil carbon and nitrogen under trash blanketing**. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, Brisbane. Proceedings... Brisbane, v. 22, p. 217–224, 2000.

THORBURN, P. J.; MEIER, E. A.; PROBERT, M. E. Modelling nitrogen dynamics in sugarcane systems: recent advances and applications. **Field Crop Research**, v. 92, n. 2-3, p. 337–352, 2005.

THORBURN, P. J.; PROBERT, M. E.; ROBERTSON, F. A. Modelling decomposition of sugar cane surface residues with APSIM–Residue. **Field Crop Research**, v. 70, n. 3, p. 223-232, 2001.

THORBURN, P. J.; VAN ANTWERPEN, R.; MEYER, J. Y.; BEZUIDENHOUT, C. N. The impact of trash management on soil carbon and nitrogen: I modelling long-term experimental results in the South African sugar industry. PROCEEDINGS OF THE SOUTH AFRICAN SUGAR TECHNOLOGISTS' ASSOCIATION MOUNT EDGECOMBE. **Proceedings...** Mount Edgecombe, 2002. v. 76, p. 260–268.



Tabuleiros Costeiros