



Simulação do efeito do manejo da palha e do nitrogênio na produtividade da cana-de-açúcar

Leandro G. Costa¹, Fabio R. Marin², Daniel S. P. Nassif³, Helena M. S. Pinto⁴ & Maria L. R. C. Lopes-Assad⁵

¹ LEB/ESALQ/USP/PPGESA. Piracicaba, SP. E-mail: legarcosta@gmail.com (Autor correspondente)

² LEB/ESALQ/USP/PPGESA. Piracicaba, SP. E-mail: fabio.marin@usp.br

³ LEB/ESALQ/USP/PPGESA. Piracicaba, SP. E-mail: dspnassif@gmail.com

⁴ LEB/ESALQ/USP/PPGESA. Piracicaba, SP. E-mail: helena_ft@hotmail.com

⁵ DRNPA/UFCar. Araras, SP. E-mail: assad@cca.ufscar.br

Palavras-chave:

modelagem
palha de cana
cogeração
adubação nitrogenada

RESUMO

Propôs-se, com este trabalho, modelar o crescimento e a produtividade da cana-de-açúcar em sistemas de colheita mecanizada avaliando o efeito da remoção da palhada remanescente em combinação com doses de adubação nitrogenada de 60, 120 e 180 kg ha⁻¹. Utilizou-se o modelo APSIM-Sugar calibrado com base em dois experimentos localizados em Piracicaba, SP, e Salinas, MG, conduzidos com a variedade SP80-1842. Avaliou-se a sensibilidade do modelo aos parâmetros de solo e de variedade, em especial aqueles relacionados à dinâmica da matéria orgânica do solo e do nitrogênio. O modelo mostrou-se capaz de descrever adequadamente o crescimento da cana-de-açúcar nos dois ambientes produtivos. As simulações indicaram que a remoção da palha para utilização na indústria acarretaria redução da produtividade no longo prazo e que a elevação na adubação nitrogenada até 180 kg ha⁻¹ não seria suficiente para compensar a queda na produção.

Key words:

modeling
sugarcane industry
cogeneration
nitrogen fertilization

Simulating trash and nitrogen management effects on sugar cane yield

ABSTRACT

The objective of the study was to model the growth and productivity of green and burnt sugarcane harvesting systems, under three nitrogen fertilizer levels (60, 120 and 180 kg ha⁻¹). APSIM-Sugar crop model was previously calibrated based on two field experiments conducted in Piracicaba, SP and Salinas, MG, with the cultivar SP80-1842. The sensitivity of the model was evaluated for the parameters of soil and variety, especially those related to the soil organic matter dynamics and nitrogen. The model simulated well the sugarcane growth and yield in the evaluated environments. Simulations showed that sugarcane yield being highly dependent on trash management. Trash removal from fields would ultimately decrease the crop yield. Simulations also revealed that the nitrogen doses as high as 180 kg ha⁻¹ would not be enough to overcome the yield lost due to trash removal.

INTRODUÇÃO

O Brasil está entre os maiores produtores agrícolas do mundo, favorecido pela extensa área agricultável e clima adequado à produção vegetal durante o ano todo. Dentre os produtos agrícolas brasileiros, a cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) se destaca pela importância econômica, social e ambiental (Goldemberg, 2007). Sua produção tem aumentado desde o início do século XXI com a implantação da cultura em novos locais, impulsionada principalmente pelo consumo de etanol no mercado interno e pelos bons preços do açúcar no mercado internacional (Marin et al., 2011).

Entre os países emergentes o Brasil ganhou destaque como modelo no uso de energia renovável notadamente pela produção de biocombustíveis (Balat, 2011) e pela cogeração de energia elétrica a partir do bagaço (Neves & Conejero, 2007). Nos últimos anos uma nova oportunidade apresentou-se ao

setor sucroalcooleiro no uso da palhada da cana-de-açúcar para cogeração ou mesmo na produção do etanol de segunda geração (Goldemberg, 2007).

Nos últimos 20 anos a modelagem de sistemas biofísicos tornou-se uma ferramenta acessível para o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento, intervenção e relevante para as tomadas de decisões agrícolas (Nassif et al., 2012). O Simulador de Sistemas de Produção Agrícola (APSIM, na sigla em inglês) é um modelo utilizado com credibilidade para simular os processos-chave da interação solo-planta-atmosfera (Keating et al., 2003). Esta ferramenta pode ser utilizada para estimar a produtividade de culturas, agregar valor à experimentação de campo, estudar as limitações dos sistemas com o auxílio de pesquisadores e agências de extensão, além de gerar informações confiáveis para a tomada de decisões (Heinemann et al., 2010).

Com a demanda crescente do setor sucroenergético por informações específicas da interação solo-planta-atmosfera,

como as relacionadas à produtividade do canavial, preservação do solo, cogeração de energia elétrica e produção de etanol celulósico, a utilização de modelos de simulação de culturas baseados em processos biofísicos, pode ser ferramenta útil.

Considerando a mecanização da colheita da cana-de-açúcar em praticamente todo o estado de São Paulo ao longo da última década, este trabalho teve por objetivo modelar o crescimento e a produtividade da cana-de-açúcar em sistemas de colheita mecanizada avaliando o efeito da remoção da palhada remanescente em combinação com doses de adubação nitrogenada de 60, 120 e 180 kg ha⁻¹.

MATERIAL E MÉTODOS

A análise de sensibilidade de 51 parâmetros do modelo foi feita alterando-se individualmente cada parâmetro e se fixando os demais no valor padrão. Como condição padrão para a análise de sensibilidade se utilizaram os dados obtidos após a calibração do APSIM para a variedade SP80-1842, para terceira soca no município de Piracicaba, SP. Dos parâmetros analisados 24 apresentaram maior significância para a calibração do modelo (Tabela 1). A variação nos parâmetros foi relacionada aos valores finais de produção para matéria fresca de colmos (MF), teor de sacarose (SAC) e índice de área foliar (LAI). A sensibilidade relativa dos parâmetros foi calculada com base no índice de sensibilidade absoluta (Saltelli, 2002).

A calibração do modelo APSIM-Sugar foi feita para a variedade SP80-1842 utilizando-se dados de experimentos obtidos por Gava et al. (2001) no município de Piracicaba (SP), em um talhão com cinco hectares da Usina Iracema - São Martinho S/A localizado a 22° 43' S e 47° 38' W, 546 m de altitude e por Barbosa (2005) no município de Salinas (MG),

Fazenda Experimental da Escola Agrotécnica Federal de Salinas, localizada a 16° 10' S e 42° 18' W, 472 m de altitude.

A metodologia visando a calibração do modelo foi similar à utilizada por Marin et al. (2011) no modelo DSSAT/CANEGRO. Todos os experimentos foram realizados sem restrições nutricionais para fósforo, potássio, macronutrientes secundários e micronutrientes. O modelo ainda apresenta uma limitação para solos ácidos. Como a taxa de nitrificação da amônia é influenciada pelo baixo pH (Silva & Vale, 2000), essa taxa é subestimada em solos ácidos, como os considerados neste trabalho. Com o propósito de evitar este efeito, os valores de pH dos solos simulados foram ajustados para 6,5.

Em Piracicaba o solo foi descrito por Laclau & Laclau (2009) e classificado como Latossolo Vermelho. Os dados diários de temperatura máxima e mínima (°C), precipitação (mm d⁻¹) e radiação solar global (MJ m⁻² d⁻¹) foram obtidos na estação meteorológica automática da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, em Piracicaba (SP). Os dados de solo para o município de Salinas foram extraídos do Banco de Dados de Solos do Sistema de Informações da EMBRAPA (2012). A precipitação (mm d⁻¹), temperatura média, máxima e mínima (°C) foram coletadas na estação meteorológica localizada no município de Montes Claros, MG. Os dados de radiação para a localidade de Salinas foram estimados pelo método de Bristow & Campbell (1984).

Na verificação da qualidade da calibração foram utilizados os índices R², D de Willmott e a raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Wallach et al., 2006). No experimento de Piracicaba os índices estatísticos para avaliação do desempenho do modelo foram calculados com base na massa fresca de colmos (MF) (Mg ha⁻¹) e matéria seca (MS) (Mg ha⁻¹) considerando-se dados coletados a partir do corte da segunda soca. Em Salinas-MG, a análise foi realizada apenas para MF (Mg ha⁻¹) e os resultados da simulação pelo APSIM analisados para um ciclo de cana planta.

O modelo foi utilizado para simular os efeitos da remoção ou manutenção da palhada de cana-de-açúcar em combinação com doses de nitrogênio (N), sobre a produtividade da cana-de-açúcar para os municípios de Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e São Simão, no estado de São Paulo, através dos dados meteorológicos da série histórica de 1961 a 2010 desses municípios, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2012).

Os dados de atributos químicos e físicos dos solos predominantes nos municípios de Catanduva, Presidente Prudente, São Carlos e São Simão foram extraídos do Banco de Dados de Solos do Sistema de Informações da EMBRAPA (2012). Em cada local foram simulados dois tratamentos quanto ao sistema de colheita (com e sem remoção da palhada) e três tratamentos quanto à adubação nitrogenada (60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de ureia). Nas simulações a produtividade de colmos industrializáveis por hectare (TCH) foi avaliada para a série histórica de 1961 a 2010. O delineamento adotado foi o de blocos casualizados com repetições considerando-se as 47 safras como sendo as repetições e para a comparação das médias utilizou-se o teste t Student.

Tabela 1. Parâmetros relevantes para a calibração das variedades de cana-de-açúcar no APSIM-Sugar

Parâmetro de entrada no APSIM	Sigla nos gráficos	Unidades
Sugar_cane_fraction	CF	%
Sugar_green_leaf_no	GLN	nº folhas verdes
Sugar_leaf_size	LS	mm ²
Sugar_leaf_size_no	LSN	nº folhas tamanho ¹
Sugar_min_sstem_sucrose	PC_MSS	g m ⁻²
Sugar_min_sstem_sucrose_redn	MSSR	g m ⁻²
SoilOrganicMatter_Organic_Carb	OC	%
SoilWat_KLAT	KLAT	mm d ⁻¹
SoilWat_MWCON	MWCON	%
SoilWat_SWCON	SWCON	%
Sugar_stress_factor_stalk	SFS	%
Sugar_tillerf_leaf_size	TLS	mm ²
Sugar_tillerf_leaf_size_no	TLSN	nº folhas tamanho ¹ perfilho ¹
Sugar_tt_begcane_to_flowering	TTFB	graus d ⁻¹
Sugar_tt_emerg_to_begcan	TTEB	graus d ⁻¹
Sugar_tt_flowering_to_crop_end	TTFCE	graus d ⁻¹
Water_AIRDRY	AIRDRY	mm mm ⁻¹
Water_BD	BD	g cm ⁻³
Water_DUL	DUL	mm mm ⁻¹
Water_LL15	LL15	mm mm ⁻¹
Water_SAT	SAT	mm mm ⁻¹
Water_Sugar_KL	KL	mm d ⁻¹
Water_Sugar_LL	SUGARLL	mm mm ⁻¹
Water_Sugar_XF	XF	%

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Entre todos os parâmetros alterados o DUL, parâmetro que define o estado de umidade do solo assim que toda a água higroscópica é drenada, apresentou maior influência sobre a simulação da massa de colmos. Este parâmetro regula o volume de água que pode ser armazenado no solo e, em contrapartida, afeta o estresse hídrico. Com o acréscimo de 10% no DUL e em relação à condição padrão cuja sigla é BL, a produtividade de colmos aumentou em 0,8 pontos na sensibilidade relativa (SR).

Na determinação da água disponível para as plantas foram utilizadas equações de pedotransferência propostas por Lopes-Assad et al. (2001) para estimativa do ponto de murcha permanente (-1500 kPa) ou limite inferior da água disponível (LL15) e da capacidade de campo (-10 kPa) ou limite superior da água disponível (DUL). Os resultados encontrados indicaram que, considerando a profundidade de um metro como profundidade de absorção radicular total, o solo do local de referência possui aproximadamente 0,4 mm mm⁻¹ de água no solo. Com o acréscimo de 10% no DUL, o volume de água aumenta e, em consequência, o estresse hídrico diminui sobretudo nos meses mais secos do ano, acarretando um aumento da produtividade durante a análise de sensibilidade do modelo.

Com a diminuição de 10% no parâmetro GLN, que se refere ao número de folhas verdes, observou-se decréscimo de 0,4 na produtividade de colmos visto que, com a diminuição do número de folhas verdes, há uma redução significativa na taxa fotossintética e, conseqüentemente, no potencial de acúmulo de matéria seca.

O parâmetro GLN também afetou, de forma direta, a simulação do LAI. Este parâmetro, juntamente com o SUGARLL (umidade no ponto de murcha permanente para a cana-de-açúcar), o AIRDRY (umidade no ponto de solo seco) e o SAT (umidade no ponto de saturação do solo), teve efeito sobre a disponibilidade de N para as plantas.

Com relação à quantidade de sacarose no colmo, o parâmetro de entrada mais relevante foi o SUCF5, que indica o teor máximo de sacarose no colmo por unidade de MS. Este parâmetro obteve efeito similar tanto para o aumento quanto para a diminuição de 10%, com alteração de 2,5 pontos na SR específico para a produção de sacarose nos colmos.

Além dos parâmetros de água que interferem no estresse hídrico das culturas e, conseqüentemente, nas variáveis relacionadas à translocação de solutos, outro parâmetro relevante para alteração na produção de colmos é o CF, relação entre a massa de colmos e a massa de folhas. Este parâmetro é específico para cada variedade e interfere no LAI afetando, em consequência, a capacidade fotossintética do canavial; isto ocorre porque, quanto menor a proporção de colmos (CF relativamente baixo), maior a quantidade de folhas, maior a produção de fotoassimilados, resultando em maior acúmulo de biomassa.

Os parâmetros hídricos DUL, SUGARLL, SAT, SWCON e o MWCON (Tabela 1) estão relacionados com a translocação dos solutos no perfil e com o estresse hídrico. Quando seus

valores diminuem a produtividade de colmos e o LAI decrescem. Quanto aos parâmetros tt_begcane_to_flowering (TTBF) e tt_emerg_to_begcane (TTEB), referentes à quantidade de energia térmica necessária para a emergência, crescimento e maturação da cana-de-açúcar, a redução em 10% acarretou queda no valor das variáveis de saída analisadas (produção de colmos, sacarose e no LAI) haja vista que a alteração no tempo térmico proporciona variação no período de transição entre os estádios fenológicos e interfere no crescimento, na absorção de água, nutrientes e no nível de estresse da cultura.

Na calibração do modelo o parâmetro CF foi fixado em 0,70 e o parâmetro TTEB em 1025 °C d⁻¹. Em relação à quantidade de energia térmica necessária para a emergência Marin et al. (2011) encontraram 628,1 e 628,3 °C d⁻¹, para as variedades SP83-2847 e RB82454, respectivamente, em simulações utilizando o modelo DSSAT; nota-se, então, que a variedade SP80-1842, calibrada neste trabalho para o modelo APSIM, é relativamente mais exigente em energia térmica durante a emergência.

O parâmetro leaf_size foi ajustado para variar entre 5.000 mm² para a folha número um e 50.000 mm² para a vigésima folha, com a máxima expansão em 55.000 mm², na décima quarta folha. A calibração deste atributo para a variedade SP80-1842 foi coerente com a literatura brasileira encontrando-se valores intermediários para o tamanho de folhas em outras sete variedades nacionais. Nassif et al. (2012), por exemplo, encontraram tamanho máximo de folhas variando entre 50.000 e 52.910 mm² para cinco cultivares brasileiras em experimento de campo, e Marin et al. (2011), a partir de dados observados, encontraram área foliar variando entre 36.000 e 79.600 mm².

Definiu-se o valor de 10 folhas verdes por colmo para a SP80-1842 com base nos trabalhos de Marin et al. (2011; 2012), que estudaram as variedades RB72454, SP83-2847 e RB867515, pois não se dispunham de observações de campo para a variedade em estudo.

Após a calibração o modelo descreveu adequadamente o desenvolvimento e o padrão de crescimento da variedade SP80-1842 nos dois ambientes edafoclimáticos, especialmente para MS (Tabela 2). Para MF, o desempenho do modelo também foi adequado, porém inferior ao observado para MS. Cabe destacar que o modelo APSIM-Sugar simula por meio de incrementos diários de MS, adicionando a umidade em seguida através de um algoritmo específico. Aparentemente neste processo o algoritmo não parece adequado para as variedades brasileiras.

Tabela 2. Avaliação do Modelo APSIM-Sugar para a variedade brasileira SP80-1842, em Piracicaba e Salinas, com palha (CP), sem palha (SP), irrigado (IR) e sequeiro (SQ), para massa seca (MS) e massa fresca de colmos (MF), com os índices RMSE, R² e D-index (índice D de Willmott)

	Piracicaba			Salinas		
	CP MS	CP MF	SP MS	IR MF	SQ MF	
	(Mg ha ⁻¹)					
RMSE	2,01	21,38	2,77	20,17	16,30	14,97
R ²	0,98	0,98	0,96	0,97	1,00	0,98
D-index	0,98	0,82	0,97	0,83	0,98	0,90

Nos tratamentos com e sem palha do experimento de Piracicaba os indicadores estatísticos para a predição da biomassa vegetal em termos de MS, revelaram valores de R^2 e D-index superiores a 0,91 (Tabela 2). Em Salinas o índice E para produtividade em termos de MF foi superior ao de Piracicaba ($E = 0,73$).

As simulações indicaram que a cana-de-açúcar responde positivamente à manutenção da palhada no solo (Figura 1) no longo prazo, com diferença significativa entre esses tratamentos (Tabela 3). Observou-se (Figura 1) que o clima

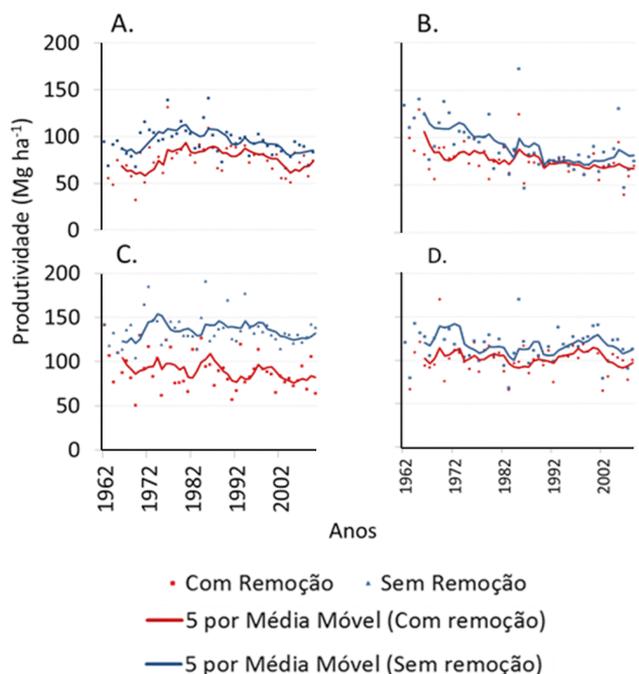


Figura 1. Variação temporal da produtividade de cana-crua e cana-queimada ao longo de 50 anos em quatro localidades do estado de São Paulo, (A) Catanduva, (B) Presidente Prudente, (C) São Carlos e (D) São Simão. As linhas representam a média móvel de 5 anos

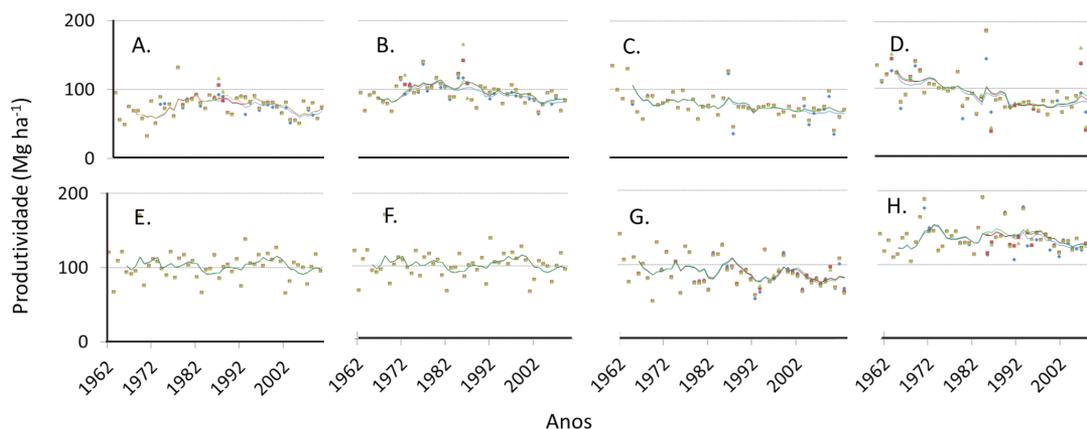


Figura 2. Produtividade de colmos ($Mg\ ha^{-1}$) em função de doses de ureia ($60\ kg\ ha^{-1}$ em azul, $120\ kg\ ha^{-1}$ em vermelho e $180\ kg\ ha^{-1}$ em verde), para a série histórica de 1961 a 2010, simulados por meio do APSIM-Sugar para: Catanduva com remoção de palhada (A), Catanduva sem remoção de palhada (B), Presidente Prudente com remoção de palhada (C), Presidente Prudente sem remoção de palhada (D), São Carlos com remoção de palhada (E), São Carlos sem remoção de palhada (F), São Simão com remoção de palhada (G) e São Simão sem remoção de palhada (H). As linhas referem-se a médias móveis de 5 anos

Tabela 3. Comparação estatística das áreas com e sem remoção da palhada da cana-de-açúcar, utilizando-se o Teste t

Tratamentos	Blocos ($Mg\ ha^{-1}$)			
	São Simão	São Carlos	Presidente Prudente	Catanduva
Com remoção	90,41 aD	135,18 aA	102,14 aC	117,38 aB
Sem remoção	77,87 bB	91,57 bA	75,60 bB	94,19 bA

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si a nível de 0,05 de probabilidade

e o solo de cada local estudado influenciaram no padrão da produtividade simulada, seja pela influência direta sobre a produtividade da cultura, seja por seu efeito sobre a taxa de decomposição de matéria orgânica do solo. Ela está relacionada à umidade do material influenciando a ciclagem de nutrientes, à disponibilidade e à imobilização do N e, em última instância, ao desenvolvimento da cultura.

A decomposição da palhada imobiliza N, sobretudo nos primeiros anos após a conversão para o sistema de colheita de cana-crua (Gava et al., 2001), o que pode acarretar elevação no estresse de N para a cultura. Recomenda-se, então, elevação da dose de N em 20 ou 30% (Vitti et al., 2007) durante os primeiros anos após a conversão.

Diferente da literatura, que sugere a diferenciação nas doses de N entre cana-planta e cana-soca (Vitti et al., 2007; Rossetto et al., 2010), nas simulações aqui realizadas, esta prática não foi adotada por uma limitação computacional, pois o modelo aceita apenas uma relação C/N inicial e também pelo fato dos algoritmos responsáveis pela simulação deste componente não serem capazes de diferenciar os ciclos produtivos da cultura quanto à absorção de N.

As simulações indicaram baixa resposta da cultura à adubação nitrogenada (Figura 2), o que parece estar relacionado a uma taxa de mineralização aparentemente superestimada. Esta, por sua vez pode, em parte, decorrer do baixo valor da relação C/N utilizada nas simulações em que, neste trabalho, se

assumiu como sendo igual a 50. A literatura, contudo, aponta que a relação C/N parte de valores mais elevados, em torno de 100, para a palhada recém-cortada caindo para cerca de 40 após o período de aproximadamente 12 meses (Oliveira et al., 1999). Infere-se, assim, que os valores da relação C/N ora utilizados, podem ter favorecido a mineralização de N e, portanto, reduzido o efeito da adubação sobre a cultura.

As simulações indicaram que a taxa de imobilização caiu nos períodos mais secos do ano, o que aumentaria a mineralização e o aporte de N para as plantas. O efeito deste N adicional depende, no entanto, da disponibilidade de água e da temperatura do solo para se efetivar (Kladivko & Keeney, 1987), condições essas que parecem ter sido plenamente atendidas nos quatro locais simulados no estado de São Paulo.

A exportação de N da área, devido à colheita dos colmos, retirada da palhada do campo, lixiviação, volatilização ou por imobilização, poderia ser suprida com a aplicação adicional de fertilizantes nitrogenados. Contudo, os resultados indicam que um aporte anual de 60 kg ha⁻¹ de ureia, aproximadamente 30 kg ha⁻¹ de N, não seria suficiente para manter a estabilidade do sistema.

Segundo Trivelin et al. (2002), por exemplo, em cana-soca as perdas totais (N derivado de ureia e outras fontes assimilados pela cana-de-açúcar) foram da ordem de 90 kg ha⁻¹ de N. Assim, tal informação reforça a tese de que a taxa de mineralização de N simulada neste trabalho parece ter sido superestimada explicando a baixa resposta da cultura à adubação nitrogenada.

Com base nas simulações para os quatro locais do estado de São Paulo, a diferença na produtividade das doses de 60 e 120 kg ha⁻¹ de ureia foi de aproximadamente 1,5 Mg ha⁻¹ (Tabela 4 e Tabela 5). Wiedenfeld & Enciso (2008) e Rossetto et al. (2010) encontraram variação média em torno de 6 Mg ha⁻¹ para a mesma variação na dose de adubação. Essa comparação corrobora o que foi discutido sobre a aparente incerteza

Tabela 4. Comparação de diferentes doses de ureia na produtividade da cana-de-açúcar, em área com remoção total da palhada, utilizando o teste t

Tratamentos (kg ureia ha ⁻¹)	Blocos (Mg ha ⁻¹)			
	São Simão	São Carlos	Presidente Prudente	Catanduva
60	90,85 aB	102,14 aA	76,64 aC	73,66 aC
120	90,43 aB	102,14 aA	77,84 aC	75,49 aC
180	89,95 aB	102,13 aA	79,13 aC	75,82 aC

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si a nível de 0,05 de probabilidade

Tabela 5. Comparação de diferentes doses de ureia na produtividade da cana-de-açúcar, em área sem remoção da palhada utilizando o teste t

Tratamentos (kg ureia ha ⁻¹)	Blocos (Mg ha ⁻¹)			
	São Simão	São Carlos	Presidente Prudente	Catanduva
60	133,87 aA	117,38 aB	89,68 aC	92,27 aC
120	135,54 aA	117,38 aB	91,92 aC	95,08 aC
180	136,13 aA	117,37 aB	93,11 aC	95,22 aC

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si a nível de 0,05 de probabilidade

relacionada à taxa de mineralização/imobilização associada ao valor da relação C/N abaixo do ideal.

Em todos os locais simulados a diferença entre a produtividade das áreas com e sem remoção da palhada (Figura 1 e Tabela 3) se deveu principalmente ao estresse hídrico. As simulações mostraram que as áreas com remoção da palhada tiveram estresse hídrico expressivamente superior ao simulado em áreas sem remoção (Figura 3) indicando que o efeito da manutenção da água no solo pela palhada é o aspecto possivelmente mais importante para explicar a maior produtividade nas áreas sem remoção.

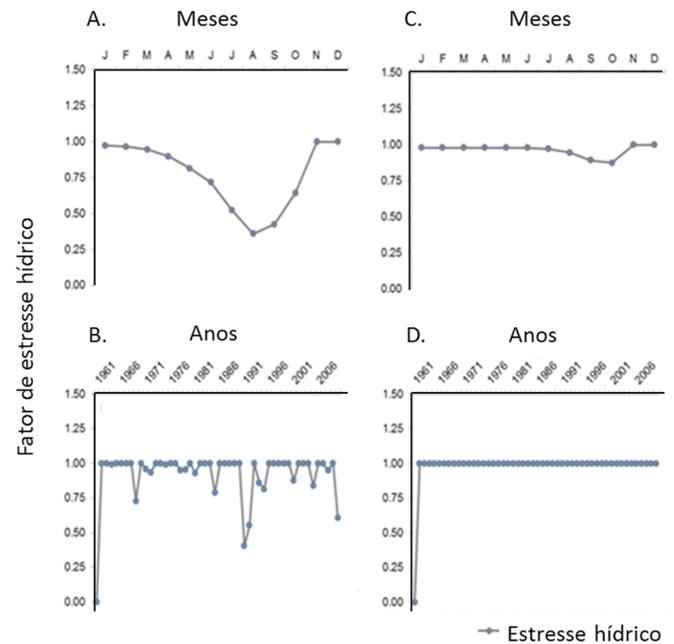


Figura 3. Fator de estresse hídrico nas simulações de cana-de-açúcar plantada com aplicação de 60 kg (ureia) ha⁻¹; fator médio mensal para áreas com remoção da palhada (1 = nenhum e 0 = máximo) (A); fator médio anual para áreas com remoção da palhada mensal (B); fator médio mensal para áreas sem remoção da palhada (C); fator de estresse hídrico anual para áreas sem remoção da palhada (D)

De modo geral, as simulações indicaram que a decisão sobre a retirada da palhada para cogeração ou produção de etanol celulósico deve levar em conta o custo da redução de produtividade no longo prazo, além dos custos convencionalmente computados neste tipo de decisão. Sugere-se, também, que aspectos ambientais relacionados ao aumento da erosão do solo, volatilização de N e lixiviação de insumos, sejam considerados e, desde que seja recomendável, que os futuros estudos utilizando o modelo APSIM foquem o ajuste dos parâmetros relacionados à decomposição de palha e nitrogênio para as condições brasileiras de cultivo.

CONCLUSÕES

1. O APSIM-Sugar foi capaz de simular adequadamente o desenvolvimento e o crescimento da cana-de-açúcar em

Piracicaba, SP e Salinas, MG, principalmente quanto à massa seca.

2. O efeito do manejo da palhada e da adubação nitrogenada na produtividade da cana-de-açúcar foi simulado adequadamente indicando que a remoção total da palhada reduziria significativamente a produtividade de colmos se comparado com a manutenção da palhada no campo.

3. As simulações indicaram que o aumento da adubação nitrogenada até 180 kg ha⁻¹ de ureia não compensaria o efeito da retirada da palha na queda da produtividade no longo prazo.

AGRADECIMENTOS

À EMBRAPA, pela parceria e financiamento através do projeto SISCANA e à UFSCar, pela oportunidade de desenvolver os estudos durante a elaboração da dissertação.

LITERATURA CITADA

- Balat, M. Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energy Conversion and Management*, v.52, p.858-875, 2011.
- Barbosa, E. A. Avaliação fitotécnica de cinco variedades de cana-de-açúcar para o município de Salinas, MG. Vitória da Conquista: Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 2005. 7p. Dissertação Mestrado
- Bristow, K. L.; Campbell G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.31, p.150-166, 1984.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema de informações de solos brasileiros. <<http://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/>>. 10 Jan. 2012.
- Gava, G. J. C.; Trivelin, P. C. O.; Oliveira, M. W.; Penatti, C. P. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.36, p.1347-1354, 2001.
- Goldemberg, J. Ethanol for a sustainable energy future. *Science*, v.315, p.808-810, 2007.
- Heinemann, A. B.; Stone, L. F.; Silva, S. C. Modelos de simulação do crescimento, desenvolvimento e produtividade na pesquisa agrônoma. 1.ed. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2010. 26p.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Dados meteorológicos. <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. 10 Jan. 2012.
- Keating, B. A.; Carberry, G. L.; 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*, v.18, p.267-288, 2003.
- Kladivko, J. E.; Keeney, D. R. Soil nitrogen mineralization as affected by water and temperature interaction. *Biology and Fertility of Soils*, v.5, p.248-252, 1987.
- Laclau, P. B.; Laclau, J. P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil. *Field Crops Research*, v.114, p.351-360, 2009.
- Lopes-Assad, M. L. R. C.; Sans, L. M. A.; Assad, E. D.; Zullo Júnior, J. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.9, p.588-596, 2001.
- Marin, F. R.; Jones, J. W.; Royce, F.; Assad, E. D.; Pellegrino, G. Q.; Justino, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yields in Southern Brazil. *Climatic Change*, v.1, p.101-110, 2012.
- Marin, F. R.; Jones, J. W.; Royce, F.; Suguitani, C.; Donzeli, J. L.; Pallone Filho, W. J.; Nassif, D. S. P. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for sugarcane Brazilian production systems. *Agronomy Journal*, v.103, p.100-110, 2011.
- 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, p.311-318, 2012.
- Neves, M. F.; Conejero, M. A. Sistema agroindustrial da cana: Cenários e agenda estratégica. *Economia Aplicada*, v.11, p.587-604, 2007.
- Oliveira, M. W.; Trivelin, P. C. O.; Gava, G. J. C.; Penatti, C. P. Degradação da palhada de cana-de-açúcar. *Scientia Agricola*, v.56, p.803-809, 1999.
- Rossetto, R.; Dias, F. L. F.; Vitti, A. C.; Cantarella, H. Fertility maintenance and soil recovery in sugarcane crops. In: Cortez, L. A. B. (ed.), *Sugarcane bioethanol R&D for productivity and sustainability*. São Paulo: Blucher, 2010. p.381-403.
- Saltelli, A. Sensitivity analysis for importance assessment. *Risk Analysis*, v.22, p.579-590, 2002.
- Silva, C. A.; Vale, F. R. Disponibilidade de nitrato em solos brasileiros sob efeito da calagem e de fontes e doses de nitrogênio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.35, p.2461-2461, 2000.
- Trivelin, P. C. O.; Oliveira, M. W.; Vitti, A. C.; Gava, G. J. C.; Bendassolli, J. A. Perdas do nitrogênio da ureia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.37, p.193-201, 2002.
- Vitti, A. C.; Trivelin, P. C. O.; Gava, G. J. C.; Penatti, C. P.; Bologna, I. R.; Faroni, C. E.; Franco, H. C. J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.42, p.249-256, 2007.
- Wallach, D.; Makowski, D.; Jones, J. W. Working with dynamic crop models: Evaluation, analysis, parameterization and applications. Amsterdam: Elsevier, 2006. 449p.
- Wiedefeld, B.; Enciso, J. Sugarcane responses to irrigation and nitrogen in semiarid South Texas. *Agronomy Journal*, v.100, p.665-671, 2008.