



Produtividade de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo baseada em simulações multimodelos e mudanças climáticas

Helena Maria Soares Pinto¹; Murilo dos Santos Vianna¹; Leandro Garcia da Costa² e Fábio Ricardo Marin^{1(*)}

¹Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP), Avenida Pádua Dias, 11, CEP 13418-900 Piracicaba, SP. E-mails: helena_ft@hotmail.com, murilodsv@gmail.com e fabio.marin@usp.br

²Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas), Rua Professor Doutor Euryclides de Jesus Zerbini, 1516, CEP 13087-571 Campinas, SP. E-mail: legarcosta@gmail.com

(*) Autor para correspondência.

INFORMAÇÕES

História do artigo:

Recebido em 22 de setembro de 2017

Aceito em 20 de dezembro de 2018

Termos para indexação:

Saccharum officinarum
mudanças climáticas
modelagem

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi simular os níveis de produção da cana-de-açúcar para o cenário atual e futuro do Estado de São Paulo, baseando-se em dois modelos de simulação de cultura (DSSAT/CANEGRO e APSIM/Sugar) e dois modelos de projeção climática (CSIRO-Mk3-6-0 e HadGEM2-ES). As simulações ocorreram para trinta e oito locais do Estado e replicadas para dois cenários de emissão, otimista (RCP 4.5) e pessimista (RCP 8.5), e para três épocas de corte (precoce, média e tardia). Os cenários futuros, em média, representaram um aumento de 3% de precipitação total anual (45 mm), 9% na temperatura média máxima (3 °C) e 15% na temperatura média mínima (3 °C) nos locais de estudo em relação ao cenário atual. Através das simulações produzidas pelos dois modelos, foi possível identificar que a massa fresca de colmos respondeu positivamente aos cenários climáticos futuros em relação ao cenário atual, chegando a 16% no modelo APSIM/Sugar e 4% no modelo DSSAT/CANEGRO, o que corresponde à redução dos riscos de produção de cana-de-açúcar. De modo geral, nenhum dos cenários climáticos futuros implicaria em perda de produtividade em relação ao padrão atual.

© 2018 SBAgro. Todos os direitos reservados.

Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é principal fonte de açúcar do mundo. Cerca de 70% da produção global é de Brasil, Índia, China, Tailândia e Paquistão, sendo o Brasil responsável por mais de 40% da produção mundial (FAO, 2016). Desta forma, a cana é uma cultura de indiscutível relevância socioeconômica para o Brasil e atualmente figura como pilar estratégico na matriz energética brasileira, produzindo etanol e eletricidade, além de ser a principal fonte de açúcar (EPE, 2015; Pereira *et al.*, 2012). Nos

últimos anos a cultura expandiu-se fortemente para região centro-oeste, devido a (i) crescimento populacional e aumento da demanda por açúcar e energia; (ii) preço atrativo do açúcar no mercado internacional; (iii) crescente frota de veículos *flexfuel*; (iv) preço atrativo das terras em comparação com região sudeste e; (v) estagnação dos níveis de produtividade em torno de 75 t ha⁻¹ (Fortunato *et al.*, 2017; Scarpate *et al.*, 2016; Walter *et al.*, 2014). Apesar da forte expansão para região centro-oeste, mais da metade da produção brasileira é da região sudeste, onde o Estado de São Paulo é responsável por mais de 54% da produção nacional

(647,625 milhões de toneladas), com 52% da área nacional plantada (8,838 milhões de ha), segundo levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2016), na safra 2016/2017.

Os níveis de produção da cana-de-açúcar brasileira são extremamente dependentes das condições meteorológicas. Tradicionalmente a cana-de-açúcar é cultivada em sistema de sequeiro no Estado de São Paulo, exigindo 1200 a 1300 mm anuais de precipitação bem distribuídos durante o período vegetativo com período frio e seco (3 a 4 meses) para garantir a maturação da cultura (Monteiro et al., 2009). Desta forma, o déficit hídrico é um dos principais fatores que prejudicam a produção da cultura, principalmente em fase inicial de brotação e durante fase de crescimento vegetativo intenso (Basnayake et al., 2015; Inman-Bamber, 2004). Nos anos de 2010 e 2014 a cana no Estado de São Paulo apresentou quebra expressiva de produtividade, baixando os níveis de cerca de 83 t ha⁻¹ para 70 t ha⁻¹ (-16%), grande parte da quebra foi devida as estiagens intensas que ocorreram neste período (Conab, 2016; Coutinho, Kraenkel e Prado, 2015). Pelo caráter semi-perene da cana-de-açúcar, o risco climático a condições adversas é elevado, e deve ser considerado como elemento na tomada de decisão agrícola e em políticas públicas, podendo ser quantificado por meio de análise histórica de clima e estimativas de produtividade.

Um dos modos de se obter estimativas de produtividade para uma determinada cultura, levando em conta o componente climático, é por meio de modelos de cultura baseados em processos (MBP) (do inglês, “*process based crop model*”). Este tipo de abordagem inclui os efeitos do clima, solo e manejo nos processos biofísicos e fisiológicos da cultura, simulando o crescimento e desenvolvimento de culturas agrícolas. Desta forma, é possível utilizar o modelo além das condições experimentais inicialmente utilizadas para desenvolvimento e calibração. Para a cana-de-açúcar, existem dois MBP disponíveis para usuários finais, o DSSAT-Canegro (DC) e o APSIM-Sugar (AS) (Jones e Singels, 2008; Keating et al., 1999), de origem sul-africana e australiana, respectivamente. Embora ambos englobem os principais processos envolvidos no crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar, suas abordagens se diferem e adaptações associadas a calibração devem ser feitas, visando representar o sistema de produção brasileiro (Costa et al., 2014).

Uma alternativa para reduzir os níveis de incerteza inerente de cada modelo é utilizar o resultado de todos os modelos disponíveis na tomada de decisão. Asseng et al (2013) mostraram que ao utilizar ao menos três MBP para cultura do trigo foi possível reduzir o erro das simulações abaixo do erro experimental (13,5% CV). Para cana-de-açúcar, Marin et al. (2013) encontraram melhor desempenho em simulações que combinam os resultados ambos os modelos

do que o uso de um deles separadamente. Embora a razão para este efeito ainda não seja clara, devido à grande complexidade em analisar as abordagens de cada modelo, este efeito vem sendo reportado por diversos autores e esta metodologia tem sido aceita cientificamente em análises do impacto do clima atual e futuro (Battisti, Sentelhas e Boote, 2017; Li et al., 2015; Rosenzweig et al., 2014; Yin et al., 2017).

De forma similar, as projeções do clima futuro geradas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças do Clima (IPCC, do inglês “*Intergovernmental Panel on Climate Change*”) utiliza simulações de diversos modelos de circulação geral (GCM, do inglês “*General Circulation Models*”) para construção dos possíveis cenários de mudanças do clima (Moss et al., 2010; Stocker et al., 2013). Neste sentido, apesar da intensa discussão em torno das mudanças climáticas globais na última década, sabe-se que as projeções acerca do clima futuro e seu impacto na agricultura contêm uma série de incertezas oriundas dos diferentes componentes do sistema de análise (e.g. clima, culturas, práticas de manejo). Portanto, o uso de diversos pacotes de modelos e possíveis cenários do clima futuro está sendo utilizado para reduzir as incertezas na análise dos impactos na agricultura que o clima oferece e poderá oferecer no futuro (Rosenzweig et al., 2013).

Diante disto, este trabalho teve como objetivo simular a produção da cana-de-açúcar para o cenário atual e futuro no Estado de São Paulo, baseando se em dois modelos de simulação de cultura (DSSAT/CANEGRO e APSIM/Sugar) e dois modelos de projeção climática (CSIRO-Mk3-6-0 e HadGEM2-ES).

Material e métodos

O presente estudo foi realizado por meio de simulações da produtividade de cana-de-açúcar (toneladas de colmos por hectare) pelos modelos APSIM\Sugar (AS) e DSSAT\Canegro (DC) (Keating et al., 1999; Singels, Jones e Berg, 2008), alimentados com séries climáticas atuais e projeções futuras. As simulações foram executadas em escala de tempo diária, portanto, foram atendidos os seguintes requisitos de dados de entrada: temperatura (i) máxima e (ii) mínima, (iii) precipitação pluvial e (iv) radiação solar. Características físico-químicas do solo como pontos de murcha permanente, capacidade de campo, saturação, CTC e teor de matéria orgânica também foram inseridos para descrever o armazenamento hídrico e o fluxo de nutrientes no solo pela cultura. Além disso, uma calibração da variedade RB867515 foi utilizada por ser uma variedade de alta representatividade (27% área plantada) nos canaviais brasileiros atualmente (CTC, 2012).

Dados Climáticos

Ambos modelos operam pontualmente em escala espacial, portanto, a seleção das variáveis entrada e estações meteorológicas utilizadas neste trabalho levou em conta as zonas homogêneas do Estado de São Paulo, bem como a qualidade e disponibilidade dos dados meteorológicos. Com isto, a demanda por dados de entrada e o grande número de cenários a serem simulados foi reduzida, mantendo a representatividade dos resultados.

Para limitar o número de pontos simulados, mantendo o compromisso com a representatividade das simulações, empregou-se adaptação da abordagem desenvolvida por van Wart et al. (2015), por meio da qual utilizou-se uma base georreferenciada contendo dados climáticos de São Paulo e estados vizinhos, mapas pedológicos e dados de análises físico-químicas de perfis de solo disponibilizados por Soares (2015). Para zonas homogêneas, a caracterização do solo baseou-se no mapa de solos do Brasil publicado pela Embrapa Solos na escala de 1:250.000. Essa base de dados possui informações como: nomenclatura, cor, textura e característica química dos solos. Nas zonas de maior dimensão espacial, como havia disponibilidade de estações meteorológicas, optou-se por simular mais de uma estação por zona, buscando assim assegurar a diversidade climática do estado de São Paulo. Desta forma, o mapa resultou em 29 zonas homogêneas distribuídas pelo Estado de São Paulo (Figura 1).

Utilizou-se as séries de dados meteorológicos obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) selecionando-se 38 estações meteorológicas, distribuídas pelo Estado de São Paulo e Estados vizinhos (Tabela 1). A seleção das estações baseou-se na representatividade de cada

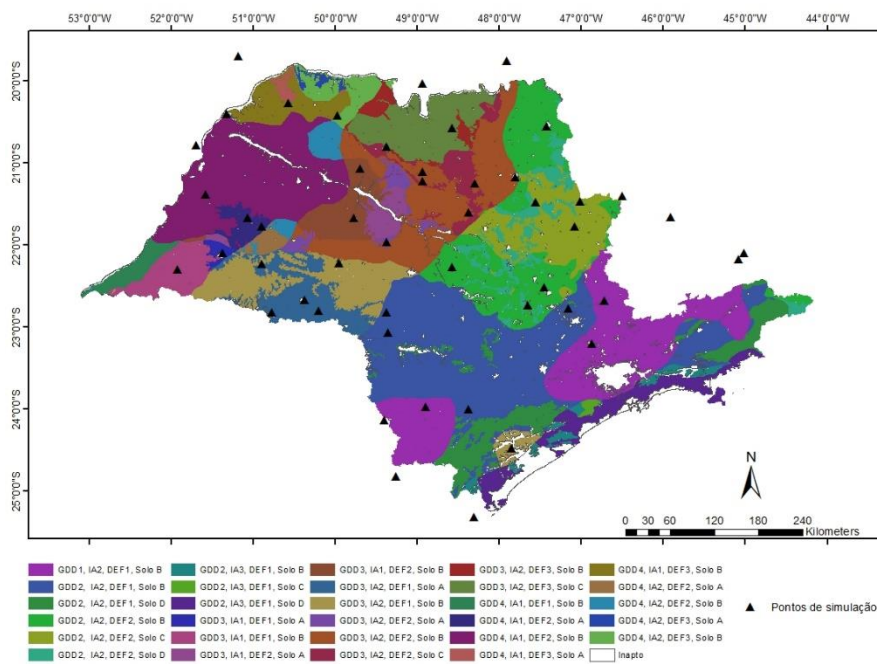
ponto de simulação em relação à sua respectiva zona homogênea, bem como na qualidade da série de dados, a distribuição espacial das estações em relação às áreas onde a cana-de-açúcar é cultivada. Tais séries constituíram o cenário atual (linha de base, “baseline”) das simulações, constituída por uma série de 26 anos de dados diários assumindo concentração de CO₂ atmosférico constante e igual a 350 ppm.

Os dados de radiação solar nos locais e períodos faltantes foram estimados com o método de Angstrom-Prescott (nos locais em que havia dados de insolação disponíveis) ou método de Bristow e Campbell (1984) com os coeficientes calibrados por Marin et al (2012). Os dados das 38 estações foram consistidos e tiveram suas falhas preenchidas com programa WGEN (Richardson e Wright, 1984). Quando disponível, utilizou-se dados de estações próximas para preenchimento de períodos com grandes falhas (maior que uma semana). Todas as séries foram uniformizadas para ter início em 1 de janeiro de 1980 e final em 31 de dezembro de 2006, totalizando 26 anos, com o intuito de padronizar o período das séries históricas e facilitar a configuração dos modelos para as simulações e convertidas em arquivos adequados ao formato exigido pelas plataformas APSIM e DSSAT.

Características pedológicas

Os perfis de solos necessários para simulações nos MBP's, para cada localidade, foram inseridos com base em análise regional a partir de mapas e perfis de solo provenientes do Projeto RADAMBRASIL (1973-1986), na escala 1:250.000, utilizando-se o programa ArcGIS 9.3/ArcMap®, como utilizado por Marin (2014). Com o uso da ferramen-

Figura 1. Mapa de zonas homogêneas do Estado de São Paulo e a localização das estações meteorológicas utilizadas nas simulações. Adaptado de Soares et al. (2015)



ta “buffer” do referido software estabeleceu-se raio de 100 km em torno de cada um dos pontos que foram cruzados com o mapa de solos e posterior cruzamento com os elementos do mapa de solo. Com base nesse procedimento, foi possível identificar e quantificar quais os solos ocorrem no

Tabela 1. Estações meteorológicas com suas respectivas latitude, longitude e altitude

Estação	Estado	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Adamantina	SP	-21,67	-51,07	409
Assis	SP	-22,67	-50,37	527
Barretos	SP	-20,57	-48,57	551
Catanduva	SP	-21,11	-48,93	570
Casa Branca	SP	-21,77	-47,08	698
Cordeirópolis	SP	-22,52	-47,45	648
Franca	SP	-20,55	-47,42	978
Ilha Solteira	SP	-20,4	-51,32	329
Itapeva	SP	-23,97	-48,9	661
Jaboticabal	SP	-21,25	-48,3	589
Jales	SP	-20,27	-50,57	484
Jaú	SP	-22,27	-48,57	555
José Bonifácio	SP	-21,07	-49,7	454
Lins	SP	-21,67	-49,77	439
Manduri	SP	-23,07	-49,35	570
Marília	SP	-22,22	-49,95	683
Matão	SP	-21,6	-48,37	563
Frutal	MG	-20,03	-48,93	546
Machado	MG	-21,66	-45,91	857
Uberaba	MG	-19,75	-47,91	788
Mirante do	SP	-22,3	-51,92	414
Paranapanema				
Mococa	SP	-21,47	-47,01	621
Paranaíba	MS	-19,7	-51,18	419
Três Lagoas	MS	-20,78	-51,7	328
Osvaldo Cruz	SP	-21,77	-50,9	479
Palmital	SP	-22,8	-50,2	501
Paulínia	SP	-22,77	-47,15	601
Pedrinhas	SP	-22,82	-50,77	354
Paulista				
Pindorama	SP	-21,22	-48,93	587
Presidente	SP	-22,1	-51,37	430
Prudente				
Rancharia	SP	-22,23	-50,9	517
Ribeirão Preto	SP	-21,17	-47,8	568
Santa Cruz do	SP	-22,82	-49,37	566
Rio Pardo				
São José do	SP	-20,8	-49,37	515
Rio Preto				
São Simão	SP	-21,48	-47,55	668
São Carlos	SP	-21,96	-49,37	856
Tupi Paulista	SP	-21,38	-51,58	395
Votuporanga	SP	-20,42	-49,97	498

entorno de cada ponto, selecionando-se então o solo mais representativo de cada ponto. Após essa seleção, foi realizada busca no banco de dados de perfis de solos da Embrapa (<http://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/>) coletando-se informações coincidentes em relação a classificação do solo, bem como, perfil de solo mais próximo ao ponto de simulação selecionado. Para os perfis que não contavam com os parâmetros físico-hídricos, utilizou-se as equações de pedotransferência para os solos brasileiros estabelecidas por Tomasella, Hodnett e Rossato (2000).

Calibração da variedade de cana-de-açúcar (RB867515)

A variedade RB867515 foi previamente calibrada para os modelos APSIM/Sugar e DSSAT/Canegro (Tabela 2 e 3) conforme trabalho de Marin et al. (2013), utilizando dados de 7 experimentos coletados em seis diferentes regiões do Brasil (Tabela 4).

A calibração obtida para a variedade RB867515 apresentou resultados satisfatórios na simulação da massa fresca de colmos pelos modelos AS e DC. O uso do resultado de ambas simulações melhorou a estimativa dos modelos diminuindo a incerteza quando utilizado a média entre os modelos (Marin et al., 2013).

Épocas de plantio e manejo

Com o banco de dados de entrada consolidado e parâmetros da variedade, os MBP's tiveram seu módulo de manejo ajustado para representar de modo mais próximo possível o sistema produtivo da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. Foram assumidas três datas de plantios de cana de ano (12 meses), com plantio em 15 de maio (precoce), 15 de agosto (média) e 15 de novembro (tardia), com o objetivo de avaliar a resposta da cana-de-açúcar em diferentes épocas do ano e diferentes fases de crescimento. Em ambos modelos, as configurações de irrigação, densidade de plantas, profundidade de plantio e quantidade de cortes para a reforma do canavial foram determinados buscando tornar a simulação mais próxima possível com o manejo adotado pelas usinas brasileiras para os canaviais (Tabela 5). Para o modelo AS (uma vez que o DC não simula tais aspectos) os padrões de adubação nitrogenada e sistema de colheita foram configurados como consta na Tabela 5.

Cenários futuros

A equipe responsável pelas pesquisas climáticas do projeto AgMIP – *The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project* – desenvolveu um algoritmo em linguagem “R” (R Development Core Team, 2011) que permite criar cenários futuros baseados nos RCP's. O projeto AgMIP por sua vez utilizou dados do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) que envolve cenários de 20 grupos de modelagem climática pelo mundo, totalizando 20 mo-

Tabela 2. Localização, datas de plantio e colheita, clima, solo, tratamento hídrico e profundidade máxima do sistema radicular dos locais experimentais utilizados para calibração dos modelos APSIM-Sugar, DSSAT/CANEGRO.

Localização	Datas de plantio e colheita	Clima ¹	Tratamento hídrico	Tipo de solo	Prof. Sistema Radicular (cm)
União/PI, 4°51'S, 42°52'W, 68 m asml	29/9/2007 e 16/6/2008	27°C, 1500 mm, Aw	Irrigado e sequeiro	Plintossolo (Oxisol)*	125
Coruripe/AL, 10°07'S, 36°10'W, 16 m asml	11/8/2007 e 15/12/2008	24.4 °C, 1400 mm, As'	2 níveis de irrigação parcial	Argissolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	40
Coruripe/AL, 10°07'S, 36°10'W, 16 m asml	16/8/2005 e 15/9/2006	21.6oC, 1400 mm, As'	Sequeiro	Argissolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	40
Aparecida do Taboado/MS, 20°05S, 51°18'W, 335 m asml	1/7/2006 e 9/8/2007	23.5oC, 1560 mm, Aw	Sequeiro	Latossolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	400
Colina/SP, 20°25'S, 48°19'W, 590 m asml	10/2/2004 e 1/12/2005	22.8oC, 1363 mm, Cwa	Sequeiro	Latossolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	400
Olimpia/SP, 20°26'S, 48°32'W, 500 m asml	10/2/2004 e 1/12/2005	23.3oC, 1349 mm, Cwa	Sequeiro	Latossolo Vermelho-Amarelo (Typic Hapludox)*	400
Piracicaba/SP, 22°41'S, 47°38'W, 540 m asml	16/10/2012 e 15/6/2013	22.4°C, 1280 mm, Cwa	Irrigado	Argissolo Vermelho (Typic Hapludults)*	400

*Classificação segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999) e, entre parêntess, a correspondente mais próxima segundo o U.S. Soil Taxonomy.

Fonte: Marin et al., 2015. 1 Respectivamente: temperatura média anual, chuva total anual, classificação de Koeppen

Tabela 3. Valores dos parâmetros utilizados para simulação da cultivar RB867515 para o modelo DSSAT/CANEGRO.

Parâmetro	Descrição	Unidade	RB867515
PARCEMAX	Eficiência do uso de radiação	g MJ ⁻¹	9,9
APFMX	Particionamento da biomassa total para parte aérea, na cultura madura	fraction	0,88
STKPFMAX	Particionamento da biomassa da parte aérea para os colmos	fraction	0,65
LFMAX	Número máximo de folhas verdes por colmo	fl colmo ⁻¹	10,0
MXLFAREA	Área foliar máxima	cm ²	594
MXLFARNO	Posição (n°) da maior folha no colmo		18
P11	Filocrono de folhas antes do Pswitch	°C dia	89
P12	Filocrono de folhas depois do Pswitch	°C dia	107
PSWITCH	Número de folhas para transição de filocrono		18
TTPLNTEM	Graus dias necessários para emergência da cultura (Cana-Planta)	°C dia	408
CHUPIBASE	Graus dias necessários para inicio do crescimento de colmos	°C dia	547
TT_POPGROWTH	Graus dias necessários para o pico de perfilhamento	°C dia	628
MAX_POP	População de perfilhos no pico de perfilhamento	perf m ²	16
POPTT16	População final de colmos	colmo m ²	10

Fonte: Marin et al., 2015.

delos de circulação global (Hudson e Ruane, 2015).

A base de dados desenvolvida pelo AgMIP foi disponibilizada para uso neste trabalho e os cenários foram criados para os 38 locais de simulação propostos. Os GCM's (Modelos de Circulação Global) utilizados foram CSIRO-Mk3-6-0 (G) e HadGEM2-ES (K), gerando projeções futuras para o período entre 2040 a 2065. Foram selecionados os cenários de emissão do RCP 4.5 (G) e RCP 8.5 (I), permitindo assim

a comparação com a série da linha de base (LB). O RCP 4.5 foi desenvolvido pela equipe de modelagem MiniCAM, baseada no Instituto de Investigação de Mudança Global e o Laboratório Nacional do Noroeste do Pacífico. Este é um cenário que assume a possibilidade de estabilização nas concentrações de gases pelo emprego de tecnologias e estratégias para reduzir as emissões de gases de efeito estufa até 2100, com forçamento radiativo de aproximadamente

Tabela 4. Valores de parâmetros utilizados na simulação da cultivar RB867515 para o modelo APSIM-Sugar.

Parâmetro	Descrição	Unidade	RB867515			
leaf_size	Área da folha	cm ²	3500	45000	74600	74600
leaf_size_no	Número de folha		1	5	18	26
cane_fraction	Fração de partição do colmo da biomassa acima do solo	fração	0.70			
sucrose_fraction_stalk	Fração da sacarose no colmo	fração	1	0.55		
stress_factor_stalk	Fator de estresse no crescimento do colmo		0.2	1		
tt_emerg_to_begcane	Tempo térmico da emergência ao início do crescimento do colmo	°C.d	650			
tt_begcane_to_flowering	Tempo térmico da emergência ao florescimento	°C.d	8000			
tt_flowering_to_crop_end	Tempo térmico da emergência ao florescimento	°C.d	2000			
green_leaf_no	Número máximo de folhas verdes	fl colmo ⁻¹	13			
tillerf_leaf_size	Fator de perfilhamento		2	3	3	2
tillerf_leaf_size_no	Número de perfilhos		1	5	10	26

Fonte: Marin et al., 2015.

4,5 W m⁻² e concentração de CO₂ em torno de 650 ppm. O RCP 8.5 foi desenvolvido pelo Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados, na Áustria e é caracterizado pelo aumento das emissões de gases de efeito estufa que levam a altas concentrações desses gases ao longo do tempo, onde o forçamento radiativo é maior do que 8,5 W m⁻² e a concentração de CO₂ maior do que 1370 ppm. Sinteticamente, pode-se afirmar que o RCP 4.5 é de mudanças no padrão de emissões de gases de efeito estufa, enquanto o RCP 8.5, de aumento das emissões.

Simulações dos cenários atual e futuros

Com as séries climáticas futuras criadas e formatadas, os dados foram organizados em dois cenários de emissões (RCP 4.5 e RCP 8.5) e pelos modelos de circulação geral CSIRO-Mk3-6-0 (G) e HadGEM2-ES (K), com três épocas de corte/colheita da cana-de-açúcar para cada local, como sumarizado esquematicamente na Figura 2.

Para as simulações do cenário atual foram utilizadas séries de 26 anos de dados diários, assumindo concentração de CO₂ de 350 ppm. No entanto, nas simulações futuras a concentração de CO₂ foi de 650 ppm e 1370 ppm, respectivamente para os RCP's 4.5 e 8.5. Não foram simuladas alterações na radiação solar. Os tratamentos foram replicados para cada estação e os resultados das simulações foram extraídos dos arquivos de saída dos modelos para avaliar o desempenho da cultura sob os diferentes cenários climáticos. Os tratamentos realizados para as simulações de crescimento e produtividade nos cenários futuros totalizaram 456 combinações (38 municípios, 2 cenários, 2 GCM's, 3 períodos de corte) que somados à simulação do cenário atual (38 municípios, 1 cenário, 3 períodos de corte), totalizaram 570 tratamentos. Considerando que essas simulações foram feitas para 26 anos, tem-se que os modelos DC e AS simularam 14820 ciclos de cana-de-açúcar.

Resultados e discussão

Análise dos cenários climáticos futuros

Este estudo demonstrou, para os locais analisados, que os cenários futuros, em média, representaram um aumento de 3% de precipitação total anual (45 mm), 9% na temperatura média máxima (3 °C) e 15% na temperatura média mínima (3 °C) na comparação ao cenário atual. Ao caracterizar cada cenário individualmente (Tabela 6), pôde-se observar que o cenário GG projetou manutenção da quantidade de chuva e aumento cerca de 2 °C nas temperaturas máxima e mínima. O cenário GK, por sua vez, indicou aumento de 5% na quantidade de chuvas e de 2,5 °C nas temperaturas máxima e mínima, enquanto que o cenário IG projetou aumento de 3% para o total de chuva e de 3 °C nas temperaturas. No cenário IK observou-se projeção de aumento de 5% para o quantitativo de chuvas e de 3 °C nas temperaturas máxima e mínima (Tabela 6). De modo geral, é possível sumarizar os quatro cenários comparando-os entre si da seguinte forma: GG sendo seco com aumento de 2 °C, GK úmido com aumento de 2,5 °C, IG seco com aumento de 3 °C e IK úmido com aumento de 3 °C de temperatura.

De modo geral, a alteração média dos quatro cenários, apontaram que em termos de precipitação pluvial o mês de maio terá aumento no total de chuvas em 20 mm, representando 30% de acréscimo, e o mês de dezembro terá redução de 12mm (6%) na precipitação. Quanto à temperatura média, setembro será o mês mais afetado, com aumento de 3,1 °C (14%), enquanto que fevereiro terá o menor incremento, alcançando 1,9 °C (7%).

Cenários agrícolas futuros para cana-de-açúcar

Com base nas simulações produzidas pelos 2 modelos foi possível identificar que a massa fresca de colmos nos cenários futuros respondeu positivamente ao clima futuro (Tabelas 8 e 9) em relação à linha de base (LB), chegando a

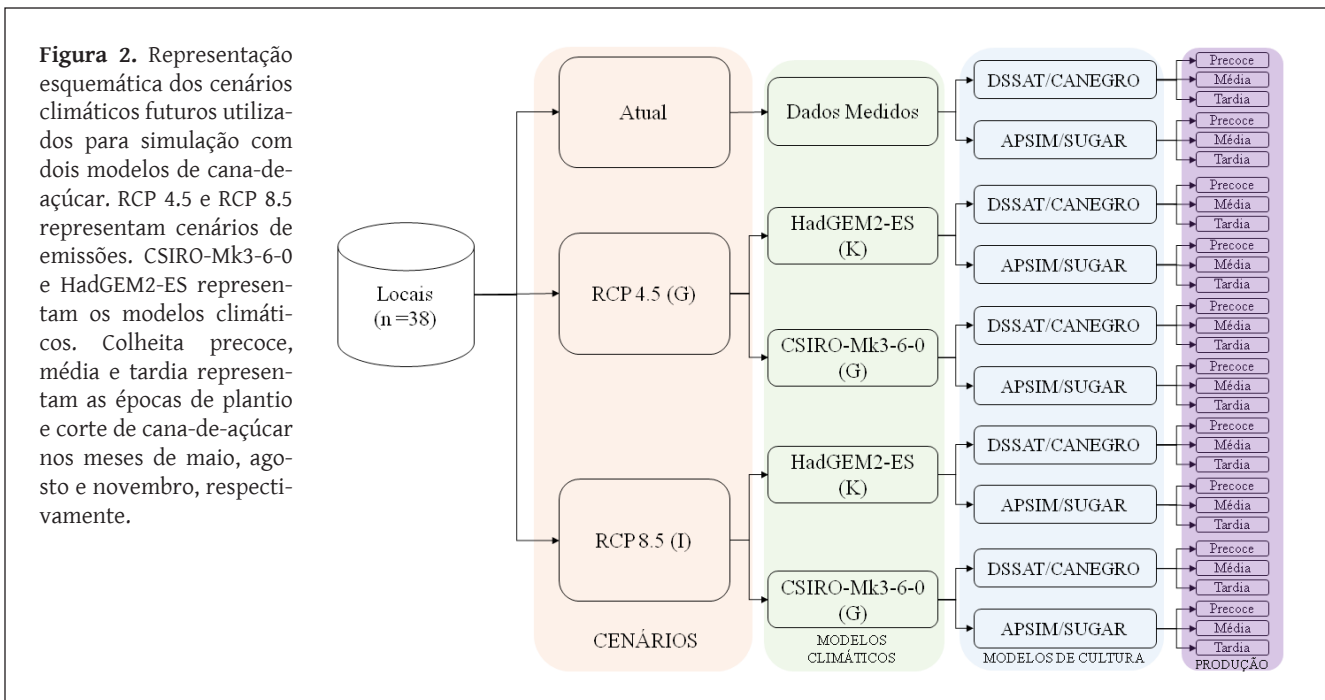


Tabela 5. Descrição do padrão de manejo utilizado nas simulações com os modelos

Manejo	Descrição
Adubação	Cana planta: Aplicação de 30 kg/ha 60 dias após o plantio e colheita
	Cana soca: Aplicação de 120 kg/ha 60 dias após o plantio e colheita
Irrigação	Não há
Ocorrência de queimada	Não há
Densidade de plantas (m2)	7
Cortes para reforma do canavial	5

16% no modelo AS e 4% no modelo DC (Tabela 7). De modo geral, nenhum dos cenários climáticos futuros implicaria em perda de produtividade em relação ao padrão atual. Na Tabela 7, por exemplo, nota-se que os incrementos futuros de produtividade para o modelo DC são relativamente menores que os produzidos pelo modelo AS, com aumento máximo de 5 t ha⁻¹, e essa diferença pode ser explicada pelo fato de que o AS considera o efeito da palhada ao longo prazo, conforme reportado por Costa *et al.* (2014) under three nitrogen fertilizer levels (60, 120 and 180 kg ha⁻¹, enquanto o modelo DC negligencia este efeito ou qualquer nutriente

no solo. Assim, conceitualmente, parece razoável esperar que ambos modelos com base nas calibrações utilizadas (baseadas em experimentos conduzidos em condições próximas do potencial de crescimento) produzam simulações acima dos valores comerciais médios observados em condições de campo. Além disso, por simular mais processos que podem produzir estresse sobre a cultura (água e nitrogênio neste caso), é fácil compreender que o modelo APSIM produza simulações com produtividade inferior ao DSSAT (que simula apenas o estresse hídrico no caso da cana-de-açúcar).

Nos cenários futuros, os modelos apresentaram produtividade mais elevada e em níveis relativamente próximos, o que parece estar associado à resposta direta e indireta da concentração de CO₂ sobre a fotossíntese e à regulação estomática, como reportado por Stokes *et al.* (2016). A regulação estomática é afetada pela elevação da concentração de CO₂ nos cenários futuros, com fechamento parcial dos estômatos e conseqüentemente elevando a eficiência do uso da água. Esse efeito, vale ressaltar, ocorre sem que haja limitação na absorção do CO₂, uma vez que o gradiente de concentração entre a cavidade estomática e o ar livre será suficientemente elevado para assegurar um suprimento ideal de CO₂ no mesofilo foliar, mesmo que os estômatos estejam relativamente menos abertos.

No trabalho de Marin *et al.* (2013), utilizou-se o modelo

Tabela 6. Caracterização climática dos cenários futuros em relação ao clima atual.

Cenários	GG			GK			IG			IK		
	Chuva	Tmáx	Tmín	Chuva	Tmáx	Tmín	Chuva	Tmáx	Tmín	Chuva	Tmáx	Tmín
Varição relativa (%)	0	8	14	5	8	15	3	9	17	5	10	16
Varição (mm ou °C)	-1	2	2	73	2	3	42	3	3	67	3	3

Tabela 7. Média ponderada das simulações de massa fresca de colmo atingível produzidas pelos modelos APSIM e DSSAT com relação aos 38 locais simulados, em 4 cenários climáticos futuros em relação ao clima atual, assumindo que 28% da área plantada era de cana precoce, 44% de cana média e 28% de cana tardia.

Cenário	Média Ponderada de Produtividade - APSIM t ha ⁻¹	Média Ponderada de Produtividade - DSSAT t ha ⁻¹
LB	(100)	(115)
GG	114	117
GK	116	120
IG	119	119
IK	118	120

DC calibrado com um conjunto de dados experimentais coletados na região centro-sul do país, para projetar cenários futuros para o Estado de São Paulo, considerando quatro cenários climáticos produzidos pelos modelos de circulação geral da atmosfera PRECIS e CSIRO, com projeções futuras bastante favoráveis (ganhos de 1% para PRECIS B2, ciclo tardio até 54% no PRECIS A2, ciclo precoce) para a produtividade dos canaviais paulistas. Naquele trabalho, os autores apontaram a sensibilidade do modelo DC à elevação da concentração de CO₂ como principal razão para tais resultados. Embora esse efeito não foi pronunciado diretamente na taxa fotossintética (Marin *et al.*, 2015; Stokes *et al.*, 2016), sendo um efeito secundário de atenuação do estresse hídrico pelo fechamento parcial dos estômatos sob elevadas concentrações de CO₂. Apesar de não tão expressivos (na ordem de 5 a 7%), alguns autores relataram incrementos na taxas fotossintéticas da cana-de-açúcar sendo uma das possíveis hipóteses a diminuição do vazamento de CO₂ pela bainha do feixe (Souza *et al.*, 2008; Vu, Allen e Gesch, 2006).

Outro aspecto a diferenciar a resposta dos modelos AS e DC aos cenários climáticos futuros está relacionado com a sensibilidade dos modelos à variação da temperatura do ar. Como mostrado em Marin *et al.* (2013) e Singels *et al.* (2014), o modelo AS tem maior sensibilidade ao aumento da temperatura do ar e normalmente simula menores produtividades sob condição de temperatura relativamente mais elevada. O modelo DC, ao contrário, mostra-se mais estável para aumentos de até 3 °C na temperatura do ar, passando a reduzir as estimativas de massa de colmos a partir desse valor. Isto está associado principalmente ao cômputo de graus-dia. Na versão atual do modelo DC, não há restrição para temperatura base superior no cômputo de graus-dia, enquanto que o AS tem essa restrição para temperaturas elevadas, que parecem limitar o ritmo de desenvolvimento da cultura para os padrões observados no Brasil (Marin *et al.*, 2015).

É importante destacar o fato de que em todos os

Tabela 8. Média das simulações de massa fresca de colmo atingível produzidas pelos modelos APSIM e DSSAT com relação aos 38 locais simulados, em 4 cenários climáticos futuros em relação ao clima atual, em 3 diferentes períodos de corte.

Cenário	Média de Produtividade APSIM (t ha ⁻¹)	Média de Produtividade DSSAT (t ha ⁻¹)
LB		
Precoce	108	120
Médio	101	116
Tardio	90	108
GG		
Precoce	116	121
Médio	118	119
Tardio	104	111
GK		
Precoce	119	124
Médio	120	121
Tardio	106	115
IG		
Precoce	119	123
Médio	124	120
Tardio	110	114
IK		
Precoce	119	124
Médio	123	121
Tardio	108	115

cenários analisados, a cana-de-açúcar tem maiores ganhos de produção quando plantadas em maio (precoce) e agosto (média), o que pode ser observado na Tabela 8. Tais diferenças de produtividade nesses períodos podem ser atribuídas, principalmente, ao fato de que os canaviais de novembro (tardia) passam pelo período de maior estresse por deficiência hídrica e temperatura ainda na fase de vegetação intensa (inverno). Analogamente, as plantas cultivadas em maio e agosto têm seu plantio realizado no outono e inverno, porém, em sua fase de intenso crescimento têm radiação solar e água no solo em níveis relativamente melhores, com consequências positivas sobre a produtividade da cultura.

A média ponderada por estação, cenário e modelo são apresentadas na Figura 4, onde pode-se observar que na maioria dos locais analisados o modelo DC apresentou níveis de produtividade maiores que no modelo AS. Foram exceções as localidades de Assis/SP, Cordeirópolis/SP, Jaú/SP, José Bonifácio/SP, Matão/SP, Palmital/SP, Pedrinhas Paulistas/SP, Pindorama/SP, Presidente Prudente/SP, São Carlos/SP e São Simão/SP e uma possível causa para este padrão inverso (com produtividade do AS maior que o DC) pode estar relacionada com as diferentes de respostas dos modelos à disponibilidade de água (Marin *et al.*, 2015).

Tabela 9. Probabilidade de não-excedência (%) para diferentes níveis de produtividade consolidado para todos os municípios, em diferentes períodos de corte da cana-de-açúcar nos modelos APSIM e DSSAT e para os seguintes cenários climáticos: (gg) cenário de emissão RCP 4,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0; (gk) RCP 4,5 e GCM HadGEM2-ES; (ig) RCP 8,5 e GCM CSIRO-Mk3-6-0 ; (ik) RCP 8,5 e GCM HadGEM2-ES.

Cenário	APSIM					DSSAT				
	≤ 60 t ha ⁻¹	≤ 80 t ha ⁻¹	≤ 100 t ha ⁻¹	≤ 120 t ha ⁻¹	≤ 140 t ha ⁻¹	≤ 60 t ha ⁻¹	≤ 80 t ha ⁻¹	≤ 100 t ha ⁻¹	≤ 120 t ha ⁻¹	≤ 140 t ha ⁻¹
Precoce_LB	3	15	41	68	85	2	8	19	29	95
Precoce_GG	1	11	35	61	77	1	8	19	27	92
Precoce_GK	1	8	30	58	75	1	5	15	25	88
Precoce_IG	1	8	29	57	75	1	6	17	25	89
Precoce_IK	1	7	30	57	75	1	6	16	25	88
Médio_LB	4	21	50	76	91	2	7	20	35	99
Médio_GG	1	8	27	57	77	2	6	19	30	99
Médio_GK	1	8	25	54	76	1	5	17	27	98
Médio_IG	1	6	21	49	72	1	5	18	28	98
Médio_IK	1	7	22	50	73	1	6	17	27	98
Tardio_LB	11	39	68	87	96	7	17	31	59	98
Tardio_GG	4	22	50	73	88	4	14	26	50	99
Tardio_GK	3	20	46	70	86	4	11	23	43	99
Tardio_IG	3	15	41	66	84	3	12	23	44	99
Tardio_IK	3	18	43	67	85	3	10	22	42	99

Analisando os cenários climáticos dos 11 municípios supracitados foi possível observar um aumento de 1,25% no volume de chuva em média, para todos os cenários futuros, em relação aos outros municípios que apresentaram produtividade superior no modelo DC. Este resultado pode estar associado em parte com o desenvolvimento radicular mais rápido em perfis de solos profundos (Marin et al., 2015). Assim, as raízes aprofundam-se mais rapidamente cedo no AS, garantindo o abastecimento de água no reservatório do solo e reduzindo a influência dos períodos de seca no desenvolvimento e crescimento da cultura.

Risco de produção para os cenários agrícolas futuros com base nas simulações nos modelos APSIM-Sugar e DSSAT/CANEGRO

Uma forma útil de analisar o risco de produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo é através da probabilidade acumulada associada a níveis de produtividade e compará-los entre os dois modelos. Como já discutido, as projeções climáticas futuras indicaram aumento médio da produtividade para as três datas de colheita e todos os locais e ambos os modelos, e esse aumento correspondeu a uma maior estabilidade produtiva, com redução dos riscos de produção de cana-de-açúcar (Figura 3). Apesar desse padrão ter sido observado em todos os cenários, a redução do risco climático foi mais marcante nas projeções dos modelos IG e IK.

Tal redução do risco de quebras de rendimentos nos cenários climáticos futuros indica uma possibilidade de menor volatilidade na produção cana-de-açúcar numa região de grande importância para o país, com potencial de

melhoria no ambiente de negócios do setor e reflexos positivos sociais e econômicos. Recentemente, vale lembrar, oscilações no rendimento da cana devido ao clima e gestão tiveram grandes impactos sociais e econômicos (Marin et al., 2012b). Padrões similares de redução de risco foram também simulados para a canaviais sem irrigação na África do Sul, enquanto que lavouras irrigadas da Austrália mostraram menor potencial de ganho no futuro em decorrência das mudanças no clima (Singels et al., 2014).

Ao analisar a Tabela 9 é possível observar que o modelo AS projetou menor risco de perdas de produtividade em climas futuros do que o modelo DC, simulou menos de 140 t em 72% dos anos chegando a atingir 72% de probabilidade de produzir 140 t ha⁻¹ no cenário IG, com plantio em agosto. Uma maneira clara de interpretar esse dado exemplificado é que há 72% de chance de que no cenário IG a cana plantada em agosto produza menos de 140 t ha⁻¹, e que de igual modo, há 49% de chance da produtividade superar este nível.

Com base nas simulações do modelo AS, o cenário climático de maior risco no futuro foi o GG, com corte de novembro, indicando probabilidade de 88% para a produtividade de 140 t ha⁻¹ de cana-de-açúcar. Enquanto que o modelo DC obteve maior risco nos cenários GG com cana plantada em agosto e novembro e todos os outros cenários com cana plantada em novembro (GK, IG, IK), chegando a 99% de probabilidade de produzir menos de 140 t ha⁻¹.

Maiores riscos de perda de produtividade foram observados para o ciclo tardio, o que parece coerente com a realidade produtiva, uma vez que esses canaviais enfrentam estresses maiores que os ciclos precoce e médio para

o Estado de São Paulo. Na análise dos cenários climáticos (Tabela 6), observou-se que o cenário GG projetou manutenção dos volumes de chuva e aumento de cerca de 2 °C na temperatura máxima e mínima, em média, enquanto que os outros cenários indicaram aumento também da chuva. Este parece ser o motivo mais provável para que o cenário GG apresente maior risco de produtividade nos cenários futuros. Considerando conjuntamente os resultados apresentados na Figura 3 e a discussão da seção 3.2 deste trabalho (comparando as médias de produtividade), nota-se coerência nesses conjuntos de dados, uma vez que o modelo DC aponta pequena variação do risco no futuro (Figura 3a, 3c e 3e), enquanto que o modelo AS aponta para redução mais pronunciada no risco (Figuras 3b, 3d e 3f), o que concorda com o aumento mais expressivo das médias de produtividade (Tabela 7).

A título de exemplo, foram utilizadas quatro localidades – Paulínia/SP, Adamantina/SP, Votuporanga/SP e Itapeva/SP – e tomou-se como base de referência para comparação o patamar de 80% de probabilidade de ocorrência. No município de Paulínia, por exemplo, o modelo DC projetou menor risco de produção do que o AS, com 80% de probabilidade para produtividade de 138,9 t ha⁻¹ no cenário IK, com corte em maio, indicando aumento de 3,5% na produtividade em relação à LB precoce (134,1 t ha⁻¹). Já o modelo AS, para o mesmo nível de produtividade, alcançou 104,3 t ha⁻¹ de cana-de-açúcar no cenário GG, com corte em agosto, resultando em aumento de 12,5% em relação à LB precoce (91,3 t ha⁻¹). Em Adamantina, o modelo DC simulou 146,5 t ha⁻¹ no cenário IG, com corte em maio, com ganhos de 3,5% na produtividade em relação à LB precoce (141,3 t ha⁻¹). No modelo AS, o cenário IG simulou 144,3 t ha⁻¹ para 80% de probabilidade com corte em novembro, aumentando 6,3% comparado à LB precoce (135,1 t ha⁻¹). Em Votuporanga, o modelo DC projetou 139,7 t ha⁻¹ com probabilidade de 80% de ocorrência no cenário GK, com corte em maio, aumentando de 1,4% na produtividade em relação à LB precoce (137,7 t ha⁻¹) para o mesmo dia de probabilidade. O modelo AS simulou 156,1 t ha⁻¹ no cenário IG, com corte em agosto, com aumento de 13,5% em relação à LB média (135 t ha⁻¹). Em Itapeva, o modelo DC simulou 135 t ha⁻¹ no cenário GK, com corte em maio, com ganhos de 3,2% na produtividade em relação à LB precoce (130,7 t ha⁻¹). Já as simulações com o modelo AS projetaram 130,7 t ha⁻¹ para 80% de probabilidade no cenário IK, com corte em novembro, resultando em aumento de 11,2% em relação à LB média (116,1 t ha⁻¹).

A associação da redução do risco climático (Figura 3 e Tabela 8) com a elevação das médias de produtividade (Tabela 7) indicam um potencial positivo para a cana-de-açúcar caso os cenários climáticos futuros sejam confirmados. Vale também destacar que para nenhum dos cenários e modelos avaliados houve queda na produtividade ou aumento do risco de produção. Como discutido, esse padrão positivo

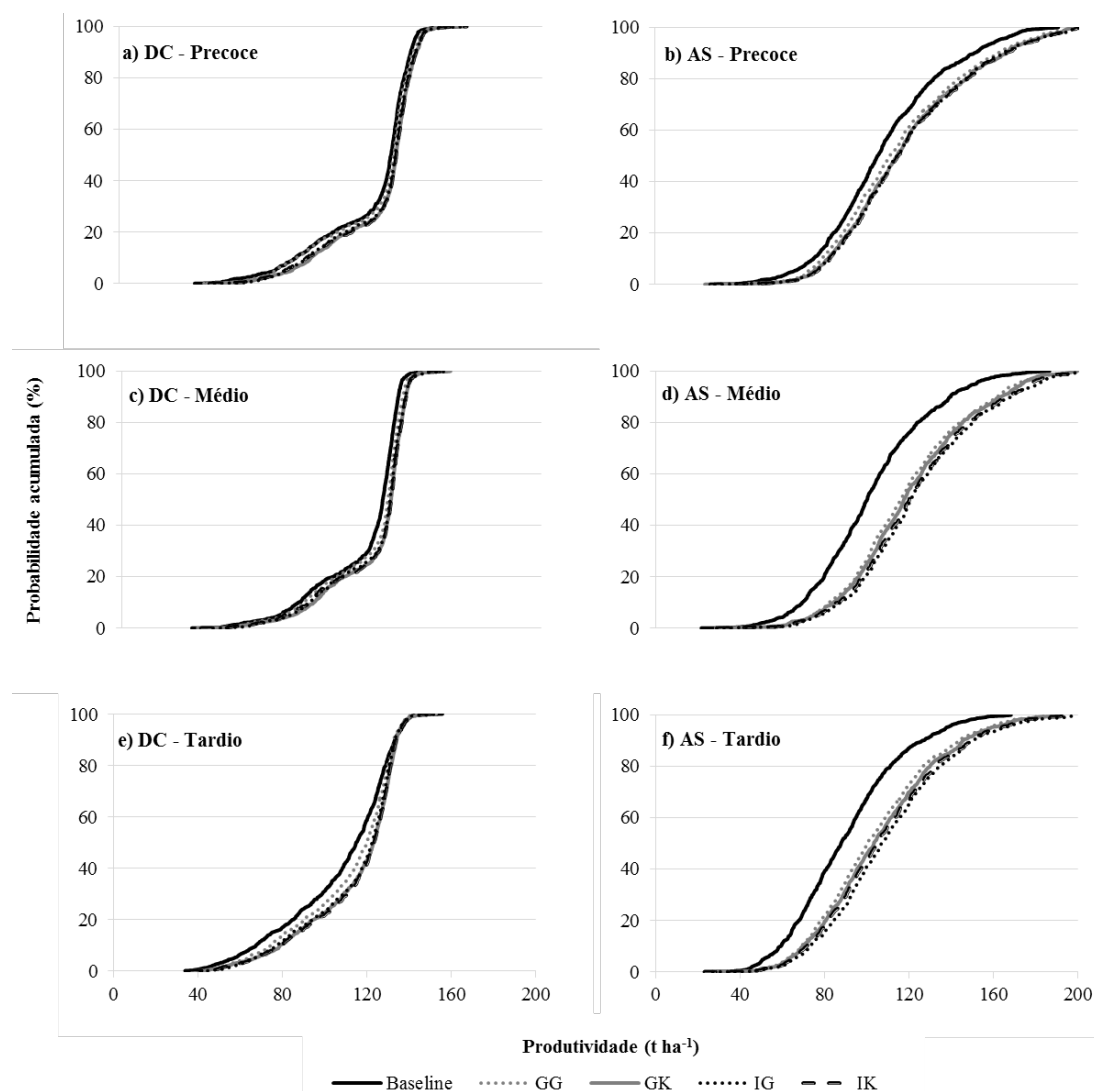
está fortemente associado a fertilização pelo CO₂, chegando a representar 50% da resposta positiva da cultura em termos de produtividade e estabilidade produtiva (Singels et al., 2013 e explica a resposta positiva mesmo havendo elevação da evapotranspiração em todos os cenários futuros sem compensação completa pela chuva. Outro importante ponto que explica esse padrão positivo de resposta é a aceleração do desenvolvimento da copa em decorrência da elevação das temperaturas, com maior interceptação da radiação solar ao longo do ciclo (Singels et al., 2013). Esses fatores explicam as diferenças de resultados observados neste estudo em comparação com as simulações feitas por Marin (2014) que encontrou possibilidade de redução da produtividade média futura para o modelo AS. Nas simulações de Marin (2014) os valores de concentração de CO₂ são menores do que os utilizados neste trabalho. Outro fator é que nos cenários climáticos futuros utilizados por Marin (2014) apontam elevação da temperatura menores do que os aqui simulados, reforçando a tese de que o aumento da temperatura associado com altas concentrações de CO₂ são as principais razões para os cenários positivos aqui observados. Como discutido por Marin et al. (2013), tais cenários reforçam a ideia de que a cana-de-açúcar continua sendo uma estratégia promissora para o Brasil no futuro, fortalecendo uma matriz energética limpa, sustentável e que agrega valor à produção agrícola do país.

Incertezas e Limitações

É importante destacar que as projeções futuras se tratam de cenários e não de previsões, e devem ser assim encaradas. Este trabalho representa um avanço no sentido de atender às recomendações de Rötter et al. (2011) e Rosenzweig et al. (2013) no sentido de se avaliar mais de um cenário climático futuro, dadas as incertezas que eles carregam. Seguindo a abordagem do projeto AgMIP, este trabalho também avança no sentido de reduzir a incerteza de análises baseadas em modelagem pelo uso de mais de um modelo de cultura, reduzindo as incertezas associadas à modelagem agrícola. Contudo, é bem sabido que os dois modelos aqui utilizados carregam consigo uma série de simplificações quanto à fertilidade e salinidade do solo, efeito de pragas, doenças e plantas daninhas. Dentre eles, apenas o modelo AS considera os processos associados ao ciclo do carbono e do nitrogênio nas respostas da cultura.

Modelo DC não considera morte das plantas por estresse hídrico. Um dos possíveis efeitos das mudanças do clima é o aumento da ocorrência de eventos extremos, seja de excesso de chuvas ou estiagens prolongadas, e apesar de considerar o efeito de estresse hídrico na cana-de-açúcar alterando a estrutura do dossel (senescência de folhas e perfilhamento), diminuindo a taxa fotossintética e de expansão da planta, as simulações do modelo DC possuem esse ponto de incerteza quando levado à níveis de estresse

Figura 3. Probabilidade acumulada de produtividade de cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$) para a linha de base e quatro cenários futuros, para as três datas de colheita de cana, nos modelos DSSAT/CANEGRO (DC) e APSIM/Sugar (AS).



letal da planta (Vianna e Sentelhas, 2014).

Uma melhoria a ser avaliada para futuros estudos está relacionada ao possível efeito da radiação solar e da umidade relativa sobre o desenvolvimento e crescimento da cana-de-açúcar, mas os cenários climáticos aqui utilizados não consideram estas duas variáveis meteorológicas, desconsiderando, portanto, essa fonte de variação no clima futuro.

Conclusões

Para os locais analisados, os cenários climáticos futuros representaram, em média, um aumento de 3% na precipitação pluvial total anual (45 mm), 9% na temperatura média máxima (3 °C) e 15% na temperatura média mínima (3 °C) em relação ao cenário atual. De modo geral, os quatro cenários foram definidos da seguinte forma: GG sendo seco com aumento de 2 °C, GK úmido com aumento de 2,5 °C, IG

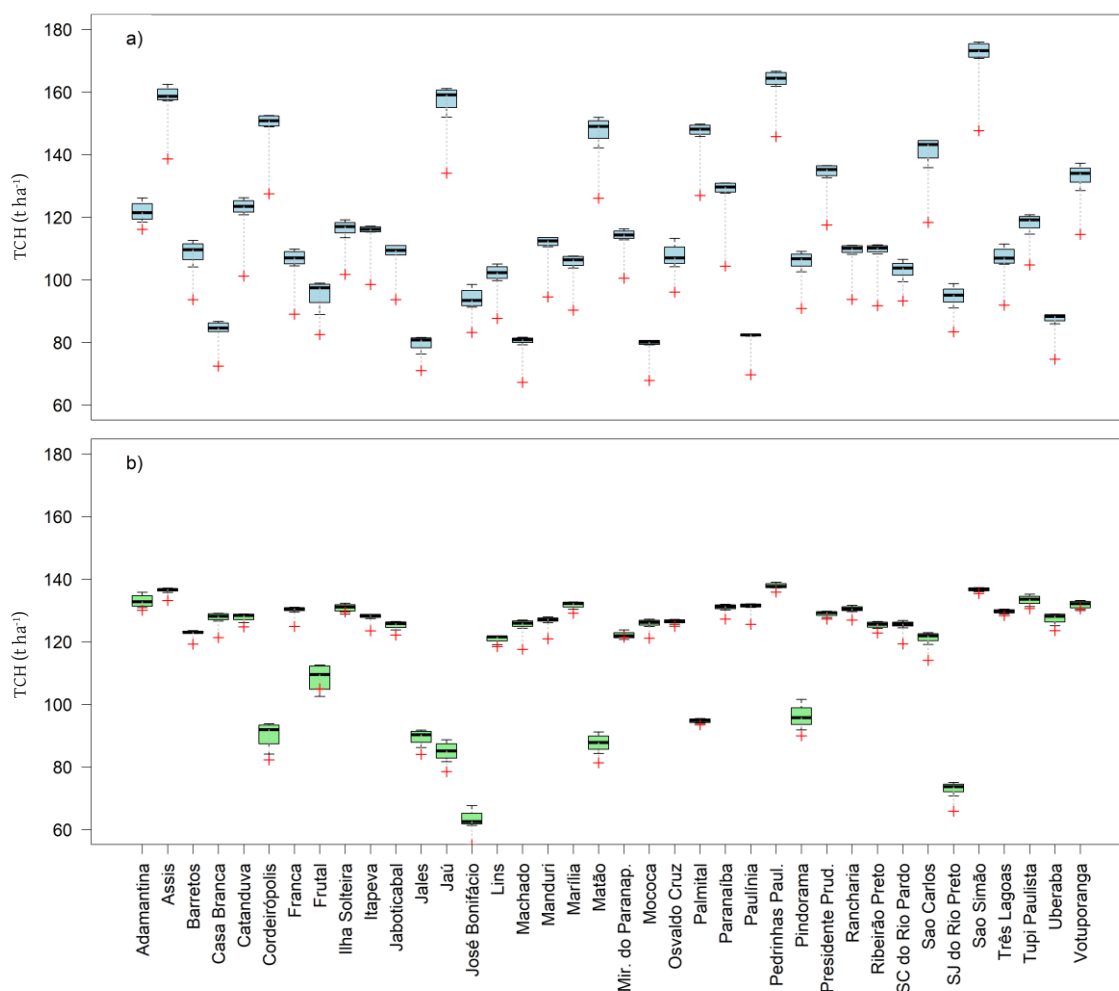
seco com aumento de 3 °C e IK úmido com aumento de 3 °C de temperatura.

As projeções climáticas futuras indicaram aumento da produtividade média para as três datas de colheita em todos os locais e ambos modelos, chegando a 16% no modelo AS e 4% no modelo DC em relação a linha de base. O modelo APSIM-Sugar indicou menor variabilidade temporal da produtividade em relação ao modelo DSSAT/CANEGRO, com redução do risco de baixa produtividade para todos os cenários, modelos e locais analisados.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pela disponibilização dos dados meteorológicos. A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento da pesquisa, processos nº 2014/05887-6, 2014/12406-4, 2013/16465-2,

Figura 4. Média ponderada das simulações de massa fresca de colmo atingível produzidas pelos modelos APSIM (a) e DSSAT (b) para cada localidade. Cruzetas vermelhas representam as simulações do cenário atual, boxplots representam a distribuição das simulações futuras (todos os cenários) e as linhas cinzas pontilhadas representam a diferença entre a mediana das simulações futuras e o cenário atual para cada localidade.



2013/16511-4 e 2017/20925-0, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processos #301424/2015-2 e #401662/2016-0, e aos revisores deste periódico pelas sugestões de melhorias e contribuições.

Referências

- ASSENG, S. *et al.* Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature climate change*, v. 3, p. 827, 9 jun. 2013.
- BASNAYAKE, J.; JACKSON, P. A.; INMAN-BAMBER, N. G.; LAKSHMANAN, P. Sugarcane for water-limited environments. Variation in stomatal conductance and its genetic correlation with crop productivity. *Journal of experimental botany*, v. 66, n. 13, p. 3945–3958, jul. 2015.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C.; BOOTE, K. J. Inter-comparison of performance of soybean crop simulation models and their ensemble in southern Brazil. *Field crops research*, v. 200, p. 28–37, 1 jan. 2017.
- 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, n. 2, p. 159–166, 1 maio 1984.
- CONAB. Acomp. Safra Bras. Cana-De-Açúcar, v. 3 – **Safra 2015/2016, n.4 – Quarto Levantamento**, Brasília, p. 1-82, abr. 2016.
- COSTA, L. G.; MARIN, F. R.; NASSIF, D. S. P.; PINTO, H.; LOPES-ASSAD, M. L. Simulação do efeito do manejo da palha e do nitrogênio na produtividade da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi*, v. 18, n. 5, 2014.
- COUTINHO, R. M.; KRAENKEL, R. A.; PRADO, P. I. Catastrophic Regime Shift in Water Reservoirs and São Paulo Water Supply Crisis. *PLoS one*, v. 10, n. 9, p. e0138278, 15 set. 2015.
- DE SOUZA, A. P.; GASPAR, M.; DA SILVA, E. A.; ULIAN, E. C.; WACLAWOVSKY, A. J.; NISHIYAMA, M. Y., Jr.; DOS SANTOS, R. V.; TEIXEIRA, M. M.; SOUZA, G. M.; BUCKERIDGE, M. S. Elevated CO₂ increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. *Plant, cell & environment*, v. 31, n. 8, p. 1116–1127, ago. 2008.
- EPE. Balanço Energético Nacional. **National Report**. 2015.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT Statistics Database**. Rome, 1998. Acessado em Abr 2016.
- FORTUNATO, F. M.; VIEIRA, A. L.; GOMES NETO, J. A.; DONATI, G. L.; JONES, B. T. Expanding the potentialities of standard dilution analysis: Determination of ethanol in gasoline by Raman spectroscopy. *Microchemical journal, devoted to the application of microtechniques in all branches of science*, v. 133, p. 76–80, 1 jul. 2017.
- HUDSON, N.; RUANE, A. Guide for Running AgMIP Climate Scenario Generation Tools with R. **AgMIP**. Available online: <http://www.agmip.org/wp-content/uploads/2013/10/Guide-for-Running-AgMIPClimate-Scenario-Generation-with>, 2013.
- INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. *Field crops research*, v. 89, n. 1, p. 107–122, 10 set. 2004.

- 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, 1 maio 1999.
- LI, T. *et al.* Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions. **Global change biology**, v. 21, n. 3, p. 1328–1341, mar. 2015.
- MARIN, F. R. Understanding sugarcane yield gap and bettering crop management through crop production efficiency. In: **Crop Management-Cases and Tools for Higher Yield and Sustainability**. [s.l.] InTech, 2012. .
- ____. **Eficiência de produção da cana-de-açúcar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2014.
- MARIN, F. R.; JONES, J. W.; SINGELS, A.; ROYCE, F.; ASSAD, E. D.; PELLEGRINO, G. Q.; JUSTINO, F. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. **Climatic change**, v. 117, n. 1, p. 227–239, 1 mar. 2013.
- MONTEIRO, J. E.; OTHERS. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. 2009.
- MOSS, R. H. *et al.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, n. 7282, p. 747–756, 11 fev. 2010.
- 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.
- PEREIRA, M. G.; CAMACHO, C. F.; FREITAS, M. A. V.; SILVA, N. F. DA. The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3786–3802, 1 ago. 2012.
- RICHARDSON, C. W.; WRIGHT, D. A. WGEN: A model for generating daily weather variables. 1984.
- ROSENZWEIG, C. *et al.* The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): Protocols and pilot studies. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 170, p. 166–182, 15 mar. 2013.
- ROSENZWEIG, C. *et al.* Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 111, n. 9, p. 3268–3273, 4 mar. 2014.
- RÖTTER, R. P.; CARTER, T. R.; OLESEN, J. E.; PORTER, J. R. Crop-climate models need an overhaul. **Nature climate change**, v. 1, p. 175, 19 jun. 2011.
- SANTOS VIANNA, M. DOS; SENTELHAS, P. C. Simulação do risco de déficit hídrico em regiões de expansão do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 4, p. 237–246, 11 jun. 2014.
- ____. Performance of DSSAT CSM-CANEGRO Under Operational Conditions and its Use in Determining the “Saving Irrigation” Impact on Sugarcane Crop. **Sugar Tech**, v. 18, n. 1, p. 75–86, 1 fev. 2016.
- SCARPARE, F. V.; HERNANDES, T. A. D.; RUIZ-CORRÊA, S. T.; PICOLI, M. C. A.; SCANLON, B. R.; CHAGAS, M. F.; DUFT, D. G.; CARDOSO, T. DE F. Sugarcane land use and water resources assessment in the expansion area in Brazil. **Journal of cleaner production**, v. 133, p. 1318–1327, 1 out. 2016.
- SINGELS, A.; JONES, M.; BERG, M. VAN DER. DSSAT v 4.5 Canegro Sugarcane Plant Module. Scientific Documentation. 2008. **International Consortium for Sugarcane Modelling**, [s.d.].
- SOARES, F. A. DE A. **Zonas edafoclimáticas homogêneas das principais regiões de cana-de-açúcar do Brasil**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2015.
- STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. Climate change 2013: the physical science basis. Intergovernmental panel on climate change, working group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5). **New York**, 2013.
- STOKES, C. J.; INMAN-BAMBER, N. G.; EVERINGHAM, Y. L.; SEXTON, J. Measuring and modelling CO2 effects on sugarcane. **Environmental Modelling & Software**, v. 78, p. 68–78, 1 abr. 2016.
- TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer Functions for the Estimation of Soil Water Retention in Brazilian Soils. v. 64, p. 327–338, 2000.
- VAN WART, J.; GRASSINI, P.; YANG, H.; CLAESSENS, L.; JARVIS, A.; CASSMAN, K. G. Creating long-term weather data from thin air for crop simulation modeling. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 209–210, p. 49–58, 15 set. 2015.
- VU, J. C. V.; ALLEN, L. H.; GESCH, R. W. Up-regulation of photosynthesis and sucrose metabolism enzymes in young expanding leaves of sugarcane under elevated growth CO2. **Plant science: an international journal of experimental plant biology**, v. 171, n. 1, p. 123–131, 1 jul. 2006.
- WALTER, A.; GALDOS, M. V.; SCARPARE, F. V.; LEAL, M. R. L. V.; SEABRA, J. E. A.; CUNHA, M. P. DA; PICOLI, M. C. A.; OLIVEIRA, C. O. F. DE. Brazilian sugarcane ethanol: developments so far and challenges for the future. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**, v. 3, n. 1, p. 70–92, 22 jan. 2014.
- YIN, X. *et al.* Multi-model uncertainty analysis in predicting grain N for crop rotations in Europe. **European journal of agronomy: the journal of the European Society for Agronomy**, v. 84, p. 152–165, 1 mar. 2017.

REFERENCIAÇÃO

PINTO; H. M. S.; VIANNA, M. S.; COSTA, L. G.; MARIN, F. R. Produtividade de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo baseada em simulações multimodelos e mudanças climáticas. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.26, n.1, p.11–24, 2018.



Sugarcane crop yield predictions under climate change based on a multi-model approach for Sao Paulo State

Helena Maria Soares Pinto¹; Murilo dos Santos Vianna¹; Leandro Garcia da Costa² and Fábio Ricardo Marin^{1(*)}

¹Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ/USP), Avenida Pádua Dias, 11, CEP 13418-900 Piracicaba, SP, Brazil. E-mails: helena_ft@hotmail.com, murilodsv@gmail.com and fabio.marin@usp.br

²Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas), Rua Professor Doutor Euryclides de Jesus Zerbini, 1516, CEP 13087-571 Campinas, SP, Brazil. E-mail: legarcosta@gmail.com

(*)Corresponding author.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 September 2017

Accepted 20 December 2018

Index terms:

Saccharum officinarum

climate change

modeling

ABSTRACT

The objective of this paper was to simulate the sugarcane production levels for the present and future scenario of the State of São Paulo, based on two models of culture simulation (DSSAT / CANEGRO and APSIM / Sugar) and two models of climatic projection (CSIRO-Mk3-6-0 and HadGEM2-ES). Simulations were performed for thirty-eight state sites and replicated for two emission scenarios, optimistic (RCP 4.5) and pessimistic (RCP 8.5), and for three harvesting seasons (precocious, middle and late). Future scenarios, on average, represented an increase of 3% in total annual rainfall (45 mm), 9% in the mean maximum temperature (3 ° C) and 15% in the minimum average temperature (3 ° C) in the study sites in relation to the current scenario (baseline). Through the simulations produced by the two crop models, it was possible to identify that the fresh stem mass responded positively to future climatic scenarios in relation to the current scenario, reaching 16% in the APSIM/Sugar and 4% in the DSSAT/CANEGRO, reducing the climate risk of sugarcane production. In general, none of the future climate scenarios would imply loss of productivity relative to the current pattern.

© 2018 SBAgro. All rights reserved.

CITATION

PINTO; H. M. S.; VIANNA, M. S.; COSTA, L. G.; MARIN, F. R. Produtividade de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo baseada em simulações multimodelos e mudanças climáticas. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.26, n.1, p.11-24, 2018.