Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

O papel do manejo e da água na variabilidade espaço-temporal da eficiência agrícola de uma usina de cana-de-açúcar

Juliano Mantellatto Rosa

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2020

Juliano Mantellatto Rosa
Engenheiro Agrônomo

O papel do manejo e da água na variabilidade espaço-temporal da eficiência agrícola de uma usina de cana-de-açúcar

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011.

Orientador:
Prof. Dr. **FÁBIO RICARDO MARIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Rosa, Juliano Mantellatto

O papel do manejo e da água na variabilidade espaço-temporal da eficiência agrícola de uma usina de cana-de-açúcar / Juliano Mantellatto Rosa. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2020.

73 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. *Saccharum* spp. 2. Simulação em modelos 3. Intensificação; 4. Práticas agronômicas 5. Interações edafo-climáticas 6. Consumo hídrico I. Título

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, pela oportunidade do curso de mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas. Ao Departamento de Engenharia de Biossistemas (LEB) pela infraestruturra disponibilizada para o desenvolvimento da pesquisa científica.

Ao CnPq pela bolsa de mestrado e reserva técnica (Processo130972/2019-3)

Ao Prof. Fábio Ricardo Marin, pelo engajamento e profissionalismo de sua orientação. Agradeço pela assertividade de suas sugestões como profissional, por sua atenção e participação constante durante minha jornada no mestrado. Ainda agradeço pela generosidade com que compartilha suas ideias, conhecimentos e projetos.

À usina parceira, a qual concedeu os dados para esse trabalho

Aos funcionários do LEB, pela recepção e pela sua disposição em auxiliar.

Aos funcionários da Biblioteca Central da ESALQ/USP

Ao grupo GEPEMA (Grupo de Experimentação e Pesquisa em Modelagem Agrícola), dos quais tive a honra de participar no decorrer do mestrado.

À minha família – aos pais Edair e Cristina e ao meu irmão João (Botão) – sou grato pela participação constante em minha vida, aos incentivos dados e à formação pessoal e profissional. Aos meus pais agradeço em especial à liberdade que me propiciaram e pela generosidade Ainda gostaria de agradecer à minha tia, Márcia Helena pelo constante apoio.

À minha segunda família República Boi Babão, pelos anos de convivência, apoio e momentos de descontração.

Aos meus colegas de trabalho, Evandro e Nilson, pela generosidade e por sua imensa amizade.

À minha companheira Laura, pela paciência comigo durante meus momentos de elaboração desse trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO 5
ABSTRACT 6
1. INTRODUÇÃO 7
1.1. OBJETIVOS 11
REFERÊNCIAS 11
2. REPRESENTAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA EFICIÊNCIA PRODUTIVA DE CANA-DE-AÇÚCAR EM UMA UNIDADE SUCROENERGÉTICA ... 15
RESUMO 15
ABSTRACT 15
2.1. INTRODUÇÃO 16
2.2. MATERIAL E MÉTODOS 17
2.3. RESULTADOS 26
DISCUSSÃO 33
2.4. CONCLUSÃO 35
REFERÊNCIAS 36
3. IDENTIFICANDO E QUANTIFICANDO CAUSAS DE YIELD-GAP USANDO DADOS DE UMA USINA SUCROENERGETICA NA NA ESCALA DE TALHÃO 40
RESUMO 40
ABSTRACT 40
3.1. INTRODUÇÃO 41
3.2. MATERIAL E MÉTODOS 43
3.3. RESULTADOS 45
3.4. DISCUSSÃO 51
3.5. CONCLUSÕES 51
REFERÊNCIAS 53
4. PRODUTIVIDADE DA ÁGUA DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR 54
RESUMO 54
ABSTRACT 54
4.1. INTRODUÇÃO 56
4.2. MATERIAL E MÉTODOS 57
4.3. RESULTADOS 60
4.4. DISCUSSÃO 67
4.5. CONCLUSÃO 69
REFERÊNCIAS 69

RESUMO

O papel do manejo e da água na variabilidade espaço-temporal da eficiência agrícola de uma usina de cana-de-açúcar

O sistema de produção da cana-de-açúcar é altamente complexo e a intensificação agrícola é uma necessidade notável, dado o cenário de aumento da demanda por biocombustível relacionado à preocupaçãoes ambientais e políticas de menor emissão de dióxido de carbono, bem como um cenário de projeções de crescimento populacional pressionando a demanda para áreas de produção de alimentos. Nesse contexto, a identificação do *yield-gap* nas áreas produtivas pode ser uma ferramenta de auxílio no processo de tomada de decisões, permite que técnicas de manejo mais adequadas sejam realizadas, contribuindo para canaviais mais eficientes, possibilitando o incremento da eficiência. De acordo com as evidências de necessidade de incremento de produtividade (Ya), este estudo assume que o setor sucroenergético brasileiro exija informações consistentes para melhorar a Ya, principalmente em regiões onde as áreas cultivadas estão em expansão e a identificação das áreas ineficientes poderão ajudar na mitigação de riscos climáticos através da adaptação de melhores práticas de manejo adotadas. Os modelos de simulação podem ajudar a quantificar o *yield-gap* (Yg) a partir da estimativa da produtividade potencial e real medida nos talhões da usina podendo então ser usados para estimar o (Yg) . Assim, o presente estudo teve por objetivos quantificar e representar no espaço e tempo a eficiência agrícola de cana-de-açúcar em escala de talhão, avaliar a influência dos fatores de manejo e solo na Ya, quantificar e representar no espaço a produtividade da água no talhões comercias de cana-de-açúcar. Os resultados demonstraram que apesar da usina apresentar talhões com eficiência agrícola acima da média brasileira, ela possui potencial de incremento de Ya, evidenciado pelo amplo Yg. A avaliação dos fatores de manejo mostrou sua importância na variabilidade espaço-temporal, destacando a necessidade de melhoria nos fatores de manejo, enquanto os solos apresentaram efeito na variabilidade espacial da Ya. Em relação à produtividade da água (WP), a função linear derivada da relação entre a produtividade atingível simulada sob condições de sequeiro com água consumida pela cultura, mostrou um inclinação das linhas de regressão, cujos valores representaram ganho de 0,02 Mg ha^{-1} e 0,03 Mg ha^{-1} para Ya e Yw, respectivamente, para cada milímetro de água evapotranspirada. Houve tendência de incremento de rendimento em massa em função da evapotranspiração, uma vez que a maior disponibilidadede água para as raízes represente um fator de aumento de massa, devido à maior absorção radicular sugerindo maior consumo hídrico. Para o período de 2013-2017, o clima representou 52% da variação de WPa, enquanto os fatores de manejo contaram com 40% e o solo contribuiu com 8%. Esses resultados sugerem que apesar de o clima ser o principal fator de influência da WPa, os fatores de manejo se destacam pela grande representação da variabilidade dos dados e como fatores manipuláveis.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., Simulação em modelos, Intensificação, Práticas agronômicas, Interações edafo-climáticas, Consumo hídrico

ABSTRACT

THE ROLE OF CROP MANAGEMENT AND WATER PRODUCTIVITY ON-FARM SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF SUGARCANE YIELD EFFICIENCY

The sugarcane production system is highly complex and the agricultural intensification is a remarkable need, given the market scenario of increasead demand for biofuel related to environmental concerns and policies of lower emission of carbon dioxide, as well as a scenario of population growth projections pressing on demand for food production areas. In this context, the assessment of the yield gap in farming systems can be a tool to assist in the decisions making process, better management techniques to be used, increasing on-farm efficiency. According to how the needing to yield increase (Ya), this study assumes that the Brazilian sugar-energy sector requires information to consistently improve Ya, especially in regions where the cultivated areas are expanding and the indentification of inefficients areas can help mitigate risks influenced by climate changes adapting the better management practices adopted. Simulation in crop models can help to quantify the yield gap (Yg) by estimating the crop yield potential, and Ya measured by sugar mills can be them used for estimating the Yg. The objectives of this study were to quantify and represent spatio-temporal on-farm yield efficiency, evaluate the influence of management factors and soil in Ya, to quantify and represent in space water productivity. The results showed that despite the sugar mill presents blocks accounting to yield efficiency above the Brazilian average, it has potential to increase the yield among the plots, evidenced by the wide range of Yg between the blocks. The evaluation of management factors showed its importance in spatio-temporal variability, highlighting the need for improvement in management factors, while soils showed an effect on spatial variability. In relation to water productivity (WP), the linear function derived from the relationship between the attainable yield under rainfed conditions and evapotranspirated water by the crop, showed a slope of 0.02 Mg ha^{-1} and 0.03 Mg ha^{-1} for Ya and Yw, respectively, for each millimeter of evapotranspirated water. There was a trend to increase in mass yield due to evapotranspiration, since the greater availability of water to the roots represents an increase in mass, due to the greater root absorption suggesting greater water consumption. For the 2013-2017 period, the climate represented 52% of the WPa spatio-temporal variation, while management factors accounted for 40% and the soil contributed to 8%. These results suggest that despite the the climate is the main factor influencing WPa, the management factors stand out due to the great representation of the variability of the data as manipulable factors.

Keywords: *Saccharum* spp., Crop models simulation, Intensification, Management practices, Edapho-climatic interactions, Water consumption

1. INTRODUÇÃO

A demanda por alimentos e energia está rapidamente aumentando e continuará a crescer em vista do crescimento populacional global cuja projeção é de 30% de incremento mundial da população. A tendência de aumento populacional, pode influenciar na elevação da escassez de recursos energéticos, bem como a demanda por terra, elevando a sua competição, além da pressão pública relacionada à preservação ambiental (GODFRAY et al., 2010). O cenário de crescimento da necessidade por comida, alimentação animal e biocombustíveis pressiona a necessidade por recursos hídricos, situação a qual combinada com o panorama de mudanças climáticas faz surgir a preocupação sobre como as medidas de mitigação e adaptação podem afetar o sistema de produção alimentar (LOBELL; CASSMAN; FIELD, 2009; ROSEGRANT; RINGLER; ZHU, 2009). Este cenário, contudo, confronta com a limitação para expansão horizontal da produção agrícola, sendo que a maior parte das áreas através do mundo já foram ocupadas.

Diante desse resultado, surge a necessidade de elevação da produtividade das áreas agrícolas em uso para suprir a demanda futura por alimentos, mantendo-se o compromisso com a preservação ambiental e minimização do impacto associado aos sistemas produtivos. Atualmente, essa concepção é de que sua manutenção poderá resultar em uma acentuada elevação dos preços dos alimentos, bem como na fome e pobreza (MARIN, 2014). Entretanto, cerca de uma década atrás, poucos estudos reportavam sobre necessidade de aumento de produtividade em nível global, onde projeções realizadas por modelos computacionais apontavam a manutenção ou até mesmo queda nos preços agrícolas (VAN ITTERSUM et al., 2013).

Cada unidade de área útil aproveitável para cultivo necessitará ter uma produtividade significantemente maior que aquelas notadas atualmente. A partir disso, os setores com maiores necessidades de uso do solo serão mais pressionados pela disputa por terra, sendo que no Brasil já ocorre essa disputa. O setor canavieiro, inserido no cenário mundial de substituição de combustíveis fósseis e menor emissão de gases do efeito estufa a partir da produção do etanol como fonte alternativa de energia é um dos principais influenciados (GOLDEMBERG et al., 2014; LEAL et al., 2013; THOMPSON, 2008). Diante disso, houve um incremento de área cultivada para o centro-sul do Brasil (ADAMI et al., 2012) e especificamente no estado de São Paulo, onde a expansão se deu na região noroeste (RUDORFF et al., 2010). De modo geral, a pressão por novas áreas geradas, tem aumentado o cultivo de cana-de-açúcar em áreas de baixa fertilidade ocupadas por pastagens anterioremente e com deficiência hídrica. Regiões onde há maiores concentrações de unidades sucroenergéticas conferem maiores valores de contratos de arrendamento, demonstrando uma elevada demanda por terra (ROSA et al., 2018).

A cana-de-açúcar é uma das culturas mais importantes para a economia brasileira, por sua função na matriz energética do país, além da relevante geração de empregos impulsionando o setor

canavieiro (OLIVEIRA, 2009). O Brasil é o principal país produtor de cana-de-açúcar do mundo, contando com 40% da produção global (FAO, 2019),

O país é pioneiro no uso de fontes renováveis e dispõe de uma posição única no mundo, com diversas opções para ampliar a produção e o uso de energias limpas. A área cultivada no Brasil aumentou de 2002 a 2009, principalmente devido ao processo de substituição dos combustíveis fósseis pelos biocombustíveis. Entretanto, após esse período a crise financeira e a queda dos preços do açúcar no mercado internacional desaceleraram o setor sucroenergético brasileiro (MARIN et al., 2016).

No entanto com o surgimento da política nacional de biocombustíveis, conhecida como RENOVABIO, a qual visa o estabelecimento de metas nacionais anuais de descarbonização para o setor de combustíveis, o setor canavieiro vem se fortalecendo, com aumento da produção e da participação de biocombustíveis na matriz energética de transportes do país.Atualmente, cerca de 40% da matriz nacional é composta por fontes renováveis, com destaque para a bioenergia que representa aproximadamente 18% do total, especificamente no setor de transportes, os biocombustíveis também já substituem 10% da necessidade de óleo diesel e cerca de 40% do consumo de gasolina (FARINA; RODRIGUES, 2018)

O Brasil tem uma vantagem comparativa para ajudar a atingir a demanda para a mitigação dos gases que causam o efeito estufa por causa da abundante disponibilidade de recursos. Assim o destaque brasileiro na produção global de etanol a partir da cana-de-açúcar enfatiza o incremento oportuno da produtividade da cultura, contudo o nível de ganho de produtividade no país ao longo dos anos tem sido relativamente baixo, e a produtividade média permanece baixa se comparada ao nível de outros países produtores de cana de açúcar (Figura 1).

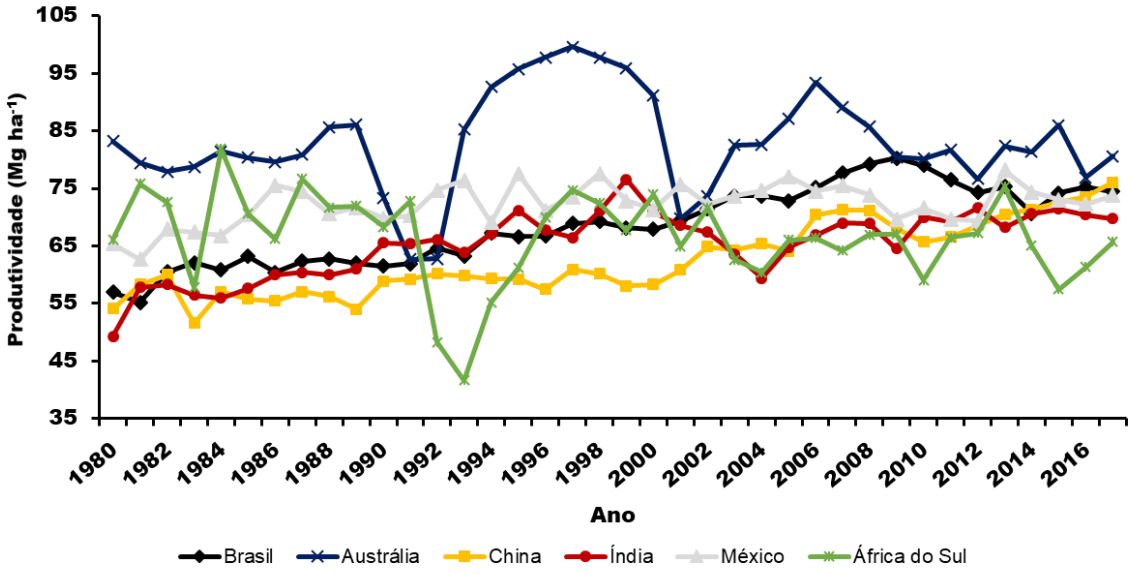

Figura 1. Produtividade [megagramas (Mg) por hectare (ha)] de cana-de-açúcar em 5 países produtores, no período entre 1980 e 2017 (http://faostat.fao.org)

A expansão da área de cultivo da cana-de-açúcar no país teve início no começo dos anos 2000 e foi impulsionado pela alta do preço do petróleo no mercado internacional e pela introdução dos carros *flex* no mercado brasileiro em 2003 (SAMANEZ et al., 2014). Dessa forma a evolução da área cultivada foi até 2014, com uma estimativa de aumento de área em torno de 290.000 ha (CONAB, 2014), contudo após esse período houve pequenas oscilações no incremento de área (Figura 2).

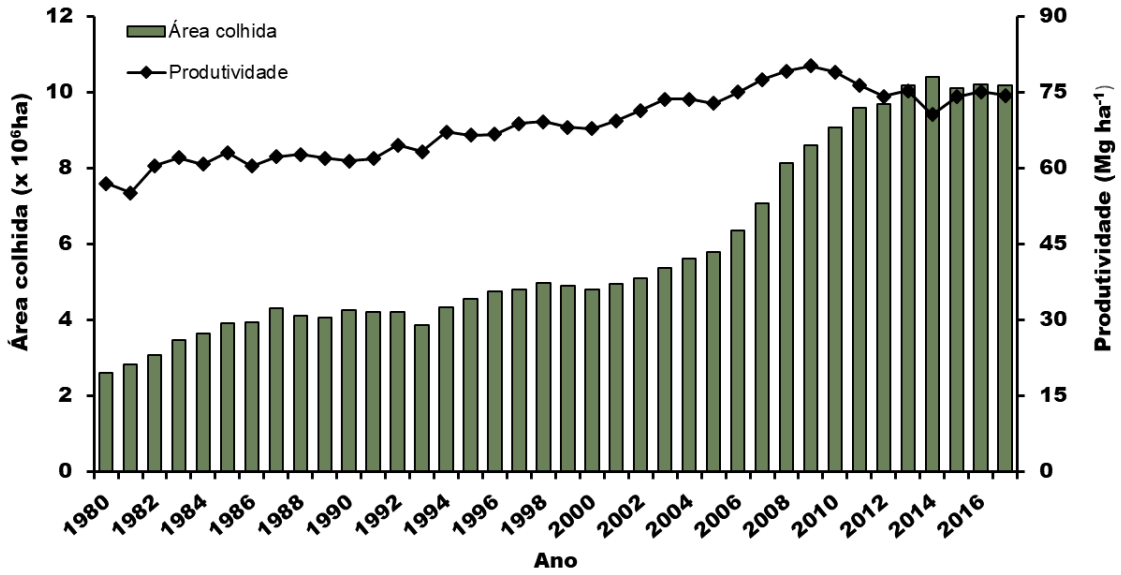

Figura 2. Produtividade e área colhida de cana de açúcar no Brasil, entre 1980 e 2017

Dentre os estados brasileiros, São Paulo destaca-se como maior produtor de cana-de-açúcar do país, sendo responsável por 55% da produção nacional (UNICA, 2019). Sendo que o cultivo de cana-de-açúcar na região nordeste do estado se tornou mais intensiva ao longo dos anos, entretando a região noroeste do estado está frequentemente em expansão (Figura 3).

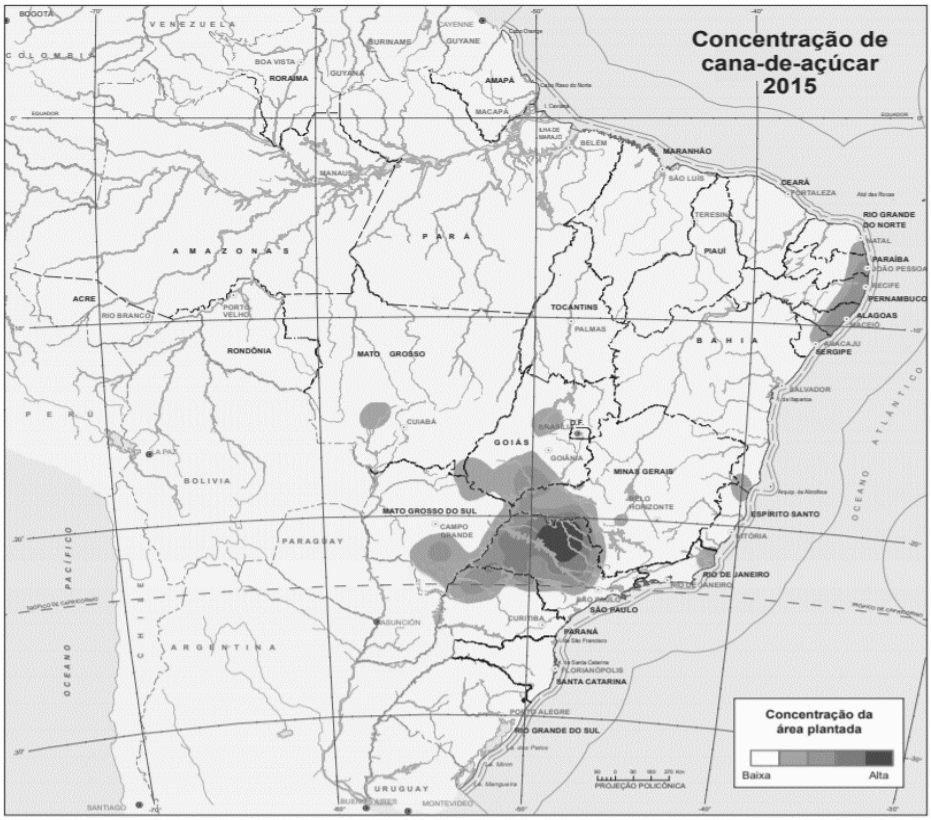

Figura 3. Mapa da distribuição e concentração da área plantada de cana-de-açúcar nas regiões Centro-Sul e Nordeste do Brasil no ano de 2015 (IBGE, 2015).

Algumas regiões do mundo têm maior potencial de incremento produtivo de forma sustentável se comparadas às outras, devido aos fatores associados ao solo, ao clima ou ao acesso à irrigação. Dentre essas regiões, há evidências que o Brasil tem potencial para atender um cenário de alta demanda com expansão da área de cultivo em torno de 13%, ou contando com redução de área em torno de 18%. No entanto, para um cenário de baixa demanda, isso exigiria uma grande aceleração na taxa de ganho de eficiência agrícola em comparação com a tendência histórica, a qual seria difícil alcançar na falta de pesquisas e esforços de extensão no setor canavieiro. Sendo assim a aceleração na taxa de ganho de eficiência agrícola é o caminho para diminuir a necessidade por áreas agricultáveis (MARIN et al., 2016).

A identificação das regiões com potenciais de incremento pode ser realizada a partir da quantificação do *yield-gap* (Yg) e da eficiência (Ef) (GUILPART et al., 2017; MONTEITH, 1977) . A Ef, por sua vez, é dada pela razão entre a produtividade atual (Ya, aquela observada em condições operacionais de uma propriedade agrícola), e a produtividade potencial (Yp, definida pelo rendimento de uma cultura determinado por radiação solar, temperatura, dióxido de carbono e características genéticas) (EVANS, 1993; VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997)), ou em relação a produtividade atingível (Yw, determinada pelos fatores anteriores, pela quantidade e distribuição hídrica durante seu ciclo de crescimento e pelas propriedades do solo que afetam sua disponibilidade hídrica (LOBELL;

CASSMAN; FIELD, 2009; VAN ITTERSUM et al., 2013; VAN ITTERSUM; RABBINGE, 1997). O Yg é definido pela diferença entre Yp ou Yw e Ya (GRASSINI et al., 2015).

A identificação da Ef e do Yg nas áreas produtivas pode auxiliar no processo de tomada de decisões e permite que técnicas de manejo mais adequadas sejam realizadas, contribuindo para canaviais mais eficientes. Dessa forma o aumento da eficiência agrícola e consequente alcance da capacidade total de moagem das usinas poderiam reduzir a demanda por expansão de terra disponibilizando essas áreas para outras atividades agrícolas, de maneira a ampliar a gama de produção e atender as demandas de um mercado em um cenário oscilante.

De acordo com as evidências de necessidade de incremento de produtividade e redução da área cultivada, este estudo assume que o setor sucroenergético brasileiro requer informações consistentes para melhorar a produção de forma sustentável, principalmente em regiões onde as áreas de cultivo estão se expandindo e a identificação das áreas com potencial de incremento poderá ajudar na mitigação de riscos climáticos através da adaptação de melhores práticas de manejo adotadas.

1.1. Objetivos

1.1.1. Geral

O objetivo principal desse estudo foi quantificar a influência do manejo e da água na variabilidade espaço-temporal da eficiência agrícola de uma usina de cana-de-açúcar.

1.1.2. Específicos

i. Quantificar e representar a variabilidade espaço-temporal da eficiência produtiva de cana-de-açúcar em escala de talhão;

ii. Identificar e quantificar as causas do *yield-gap* nos talhões de unidade sucroenergética;

iii. Quantificar e representar a variabilidade da produtividade da água da cultura da cana-de-açúcar nos talhões.

REFERÊNCIAS

ADAMI, M. et al. A Web Platform Development to Perform Thematic Accuracy Assessment of Sugarcane Mapping in South-Central Brazil. Remote Sensing, v. 4, n. 10, p. 3201–3214, 19 out. 2012.

CONAB, C. Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar. Safra, 2014.

EVANS, L. T. Crop Evolution, Adaptation and Yield., 1993.

FAO. Food and Agriculture Organization. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 17 nov. 2019.

FARINA, E.; RODRIGUES, L. A política nacional de biocombustíveis e os ganhos de eficiência no setor produtivo. Technical Report; FGV ENERGIA: São Paulo, Brasil, 2018.

GODFRAY, H. C. J. et al. Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. Science, v. 327, n. 5967, p. 812 LP – 818, 12 fev. 2010.

GOLDEMBERG, J. et al. Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. Energy Policy, v. 69, p. 14–18, 2014.

GRASSINI, P. et al. How good is good enough? Data requirements for reliable crop yield simulations and yield-gap analysis. Field Crops Research, v. 177, p. 49–63, jun. 2015.

GUILPART, N. et al. Estimating yield gaps at the cropping system level. Field Crops Research, v. 206, p. 21–32, 1 maio 2017.

[IBGE] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatítica. 2015. Dinâmica Territorial da Produção Agropecuária. Acesso em: 2019-09-20. https:// www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/analises-do-territorio/

LEAL, M. R. L. V. et al. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: A literature review. Biomass and Bioenergy, v. 53, p. 11–19, jun. 2013.

LOBELL, D. B.; CASSMAN, K. G.; FIELD, C. B. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. Annual Review of Environment and Resources, v. 34, n. 1, p. 179–204, 15 nov. 2009.

MARIN, F. et al. Prospects for increasing sugarcane and bioethanol production on existing crop area in Brazil. Bio Science 66:307–316, 2016.

MARIN, F. R. Eficiência de produção da cana-de-açucar brasileira: estado atual e cenários futuros baseados em simulações multimodelos. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Quieroz” - Tese de Livre Docência, n. May, p. 262, 2014.

MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences, v. 281, n. 980, p. 277–294, 1977.

OLIVEIRA, F. C. R. DE. Ocupação, emprego e remuneração na cana-de-açúcar e em outras atividades agropecuárias no Brasil, de 1992 a 2007 (R. Hoffmann, Ed.). Piracicaba. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP, 2009.

ROSA, J. H. M. et al. Cana-de-açúcar. Projeto campo futuro: resultados 2018, p. 120, 2018.

ROSEGRANT, M. W.; RINGLER, C.; ZHU, T. Water for Agriculture: Maintaining Food Security under Growing Scarcity. Annual Review of Environment and Resources, v. 34, n. 1, p. 205–222, nov. 2009.

RUDORFF, B. F. T. et al. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. Remote Sensing, v. 2, n. 4, p. 1057–1076, 9 abr. 2010.

SAMANEZ, C. P. et al. Evaluating the economy embedded in the Brazilian ethanol–gasoline flex-fuel car: a Real Options approach. Applied Economics, v. 46, n. 14, p. 1565–1581, 13 maio 2014.

THOMPSON, P. B. The agricultural ethics of biofuels: a first look. Journal of agricultural and environmental ethics, v. 21, n. 2, p. 183–198, abr. 2008.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-açúcar. Disponível em: <http://unicadata.com.br/>. Acesso em: 20 set. 2019.

VAN ITTERSUM, M. K. et al. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. Field Crops Research, v. 143, p. 4–17, 1 mar. 2013.

VAN ITTERSUM, M. K.; RABBINGE, R. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. Field Crops Research, v. 52, n. 3, p. 197–208, 1 jun. 1997.

2. REPRESENTAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA EFICIÊNCIA PRODUTIVA DE CANA-DE-AÇÚCAR NA ESCALA DE UMA USINA

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi analisar a variabilidade espacial e temporal da eficiência produtiva da cana-de-açúcar e o *yield-gap* para uma usina do setor sucroenergético no estado de São Paulo, Brasil, através do período de 2013-2017. Foi utilizado um modelo baseado em processos para simulações da produtividade atingível da cana-de-açúcar na escala de talhão utilizando-se uma série de dados climatológicos de 6 estações meteorológicas disribuídas na área de estuda. Dados de solo e manejo foram utilizados como dados de entrada do modelo para realização das simulações. A eficiência agrícola média da usina foi 70%, diminuindo de 76% para 70% entre o período analisado (2013 – 2017), cujo indicador não apresentou estabilidade durante o período analisado, para alguns talhões da usina foi encontrado um coeficiente de variação interanual acima de 30%. O *yield-gap* médio dos talhões foi de 31,1 Mg ha^{-1}, o qual representa 30% da produtividade atingível e 48% menor que o *yield-gap* das principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, cuja média é em torno de 79,3 Mg ha^{-1}. O *yield-gap* apresentou variabilidade interanual dos dados 10,2 a 143,0%, apresentando um ampla gama de valores. Resultados indicaram que apesar da usina apresentar eficiência agrícola acima da média brasileira, ela possui potencial de incremento de produtividade dos canaviais, evidenciado pelo amplo intervalo do *yield-gap* de produtividade dentre os talhões.

Palavras-chave: Incremento, Escala detalhada, Espaço-temporal, Bioenergia, Simulação

ABSTRACT

The objective of this study was to analyze the on-farm spatio-temporal variability of sugarcane yield efficiency and the yield-gap for a sugar mill in the state of São Paulo, Brazil, during the 2013-2017 growing seasons. we used a process-based crop model for simulating the sugarcane crop attainable yield from a climatological database provided by 6 weather stations through the study area. Soil and management data were used as model input data for simulations. The mean agricultural efficiency accounted to 70%, decreasing from 76% to 70% in the analyzed period (2013 - 2017), presenting some plot data variability across the years. The average on-farm yield-gap was 31.1 Mg ha^{-1} accounting to 30% of attainable yield and 48% smaller than the yield-gap of the main sugarcane producing regions of São Paulo state, whose mean is around 79.3 Mg ha^{-1}. The yield gap presented interannual data variability from 10 to 143%, showing a wide range. Results indicating that, despite the sugar mill accounts to mean efficiency

higher than Brazilian average, it has potential for increasing on-farm sugarcane yield.

Keywords: Yield increasing, Plots, Spatio-temporal, Biofuel, Simulation

2.1. Introdução

A partir da aplicação do conceito do Yg e da Ef na gama do setor sucroenergético podem ser baseadas análises estratégicas de mercado, como análises sobre a trajetória de custos e preços futuros dos produtos derivados de cana-de-açúcar. Além disso, podem ser realizados estudos sobre a demanda e custo por novas áreas, competição com outras atividades pelo uso do solo e a projeção de cenários agrícolas para a cultura. Dessa forma buscando-se prever como a influência mudanças nas regiões do país podem alterar as circunstâncias atuais.

A determinação da Ef pode ser usada como um índice quantitativo para avaliar o desenvolvimento de sistemas produtivos no tempo e espaço, permitindo a comparação de regiões em relação ao solo e condições climáticas, avaliar sistemas de produção, comparar a variação no tempo dentro de uma região e verificar a efetividade de técnicas de manejo utilizadas (MARIN et al., 2008). A Ef é a relação entre a produtividade atual da cultura e o quanto ela poderia produzir em situações ótimas de crescimento, onde para determinação da produtividade potencial da cultura são utlizados modelos baseados em processos.

Os modelos baseados em processos foram desenvolvidos por pesquisadores com a finalidade de se entender o comportamento de sistemas biológicos complexos de uma forma simplificada (UEHARA; TSUJI, 1998). Foi proposto a seguinte classificação de modelos: i) modelos determinísticos, quando um cálculo ou previsão é realizado por meio de processos estocásticos e resultados probabilísticos são obtidos; ii) modelos mecanísticos, quando muitos processos de cultivo são descritos por meio de equações matemáticas que determinam o crescimento e desenvolvimento da cultura; iii) modelos empíricos, incluindo equações simplificadas que representam um sistema agrícola (HOOGENBOOM, 2000).

Na agricultura, os modelos de simulação de crecimento de plantas (MCP) são potenciais ferramentas que integram o clima, solo, fatores genéticos relacionados à cultura e fatores relacionados ao manejo, permitindo a estimativa da produtividade e o teste de interações entre os fatores que condicionam a produtividade em um sistema particular (JONES; SINGELS; RUANE, 2015; WALLACH et al., 2018). Os MCP são uma representação matemática de um sistema agrícola e são considerados mecanísticos, por serem baseados em processos fisiológicos e físicos que ocorrem nas culturas, de maneira a oferecer respostas mais consistentes que modelos empíricos, cujas ferramentas são baseadas em situações de causa e efeito, com dificuldade para a extrapolação por normalmente estarem associados a características locais. Assim os MCP tornaram-se cada vez mais importantes

como ferramenta de ensino e pesquisa, ocupando lugar de destaque no âmbito científico (DOURADO-NETO et al., 1998).

Outro aspecto importante dos MCP é sua utilização como ferramenta complementar para a pesquisa experimental clássica, uma vez que é possível simular, com custos reduzidos, vários projetos experimentais e testar o desempenho de cultivares em diversos ambientes e opções de manejo, como cronogramas de fertilização e irrigação (HOOGENBOOM, 2000; JONES; SINGELS; RUANE, 2015). Além disso, esses modelos também podem ser aplicados para identificar regiões com potencial para cultivo quando ligados à sistemas de informações geográficas (SIG), permitindo a designar estratégias para o incremento de produtividade.

Para o uso adequado de um MCP para fins de planejamento agrícola, são necessários registros de dados climáticos da região de interesse. Basicamente, variáveis climáticas usadas como dados de entrada nos modelos são temperatura máxima e minima do ar, radiação solar e chuva, enquanto as outras variávies necessárias para realizar as simulações podem ser derivadas (WALLACH et al., 2018).

Estudos anteriores foram realizados envolvendo quantificação do Yg em escalas nacional e estadual de cana-de-açúcar (DIAS, 2016; LICKER et al., 2010; MONTEIRO, 2016) e para determinação da variabilidade no espaço e no tempo da eficiência agrícola (MARIN et al., 2008; MARIN; DE CARVALHO, 2012) entretanto existem poucos estudos em escala de talhão, ou seja, de forma detalhada. Assim, diante da realidade de um sistema de produção sucroenergético o qual envolve uma gama de operações agrícolas, grande mobilidade de recursos humanos e financeiros em grandes extensões de área, tornando complexos os processos de gestão e influenciando no processo produtivo da cultura da cana-de-açúcar, surge a necessidade da identificação do potencial produtivo dos talhões comerciais. Deste modo o presente estudo tem por objetivo avaliar a eficiência produtiva da cana-de-açúcar na escala de talhões, através de sua variabilidade ao longo do espaço e do tempo.

2.2. Material e métodos

2.2.1. Descrição do modelo DSSAT/CANEGRO

O sistema de Suporte à Decisão e Tranferência de Agrotecnologia (DSSAT), ou *Decision Suport System Agrotechnology Transfer* em inglês, simula o crescimento e desenvolvimento de 16 culturas ao longo do tempo, levando em conta os fatores climáticos, o solo, técnicas de manejo cultural, além de aspectos genéticos da cultura e vem sendo utilizado nos últimos 30 anos por usuários de todo mundo. O DSSAT é uma ferramenta que contém uma gama de programas independentes para a organização dos dados de clima, solo, obervações de campo, condições experimentais e informações genotípicas, incorporando diferentes modelos em um software que facilita a avaliação e aplicação dos modelos de culturas para diferentes processos (JONES et al., 2003).

O CANEGRO (INMAN-BAMBER, 1991; SINGELS, A.; JONES., M; VAN DER BERG, 2008) é um modelo de crescimento da cana-de-açúcar desenvolvido na África do Sul incluído na plataforma DSSAT. Este modelo simula o crescimento, desenvolvimento e produção da cana-de-açúcar em uma etapa diária, a partir de dados meteorológicos, cultivar, solo e do manejo cultural. Inicialmente o modelo foi desenvolvido por INMAN-BAMBER (1991) baseado no modelo CERES-MAIZE (JONES, C.A., KINIRY, 1986), passando por diversas melhorias até a compilação realizada por SINGELS et al. (2008). No modelo DSSAT/CANEGRO (DC) são realizadas simulações de processoso fisiológicos como: (i) crescimento e desenvolvimento do dossel da cultura e dos perfilhos; (ii) interceptação da radiação através do IAF; (iii) balanço hídrico a partir dos princípios da dinâmica do sistema solo-planta-atmosfera; (iv) acúmulo e partição de biomassa para diferentes componentes da planta, seguindo uma abordagem de eficiência do uso da radiação/respiração e por meio da relação fonte-dreno, cuja etapa é influenciada pela idade fisiológica da cultura e estresses hídrico e térmico (SINGELS, A.; JONES., M; VAN DER BERG, 2008).

Basicamente, os dados de entrada necessários para executar as simulações do modelo são dados climáticos de temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar e chuva, características detalhadas do solo (profundidades da camada, umidade do solo na capacidade de campo e ponto de murcha, fator de crescimento radicular, condutividade hidráulica saturada, densidade aparente, carbono orgânico e características da textura), características da cultivar e manejo da cultura. O acúmulo total de biomassa de cana-de-açúcar é impulsionado pela eficiência da conversão da radiação ativa fotossintética, fotossíntese e abordagem da respiração (INMAN-BAMBER; THOMPSON, 1989). Em adição, dados referentes à umidade relativa e velocidade do vento também podem ser inseridos, porém não são essenciais (JONES et al., 2003).

O modelo DC possui 74 parâmetros de cultura, contemplando 23 de espécie, 31 de ecótipo e 20 de cultivar. Esses conjuntos de parâmetros são subdivididos em três tipos: (I) parâmetros de ecótipos do modelo, (II) parâmetros de variedade e (III) parâmetros de espécie. No entanto, somente os parâmetros de ecótipos e variedades devem ser ajustados pelo usuário. Os parâmetros de espécie (Tabela 1), ecótipo (Tabela 2) e variedade (Tabela 3), têm a finalidade de representar as características genéticas da cultura em diferentes níveis de especificidade, sendo que os dados de variedades são considerados como as características de cada variedade de cana-de-açúcar, enquanto os parâmetros de ecótipos, também representam estas características, porém são mais estáveis. Enfim, os parâmetros de espécie representam características relacionadas à espécie referentes ao processo fotossintético, respiração, partição, crescimento radicular e resposta da cultura ao acamamento e estresse hídrico (SINGELS, A.; JONES., M; VAN DER BERG, 2008).

Para fins de cálculos de fenologia e acúmulo de biomassa, há distinção entre temperaturas base (Tb), onde considera-se uma Tb de 16ºC para o crescimento do sistema radicular em profundidade, entretanto para a emergência, quanto para a elongação dos colmos, bem como para a fenologia das folhas a Tb é de 10ºC, para a extensão da planta é empregada a Tb de 10,57ºC. Ao se

tratar da fenologia dos colmos, considera-se a Tb de 16ºC. Em relação ao processo fotossintético, o qual regula o acúmulo de biomassa, a Tb é de 7ºC, sendo considerada um parâmetro de espécie (SINGELS; DONALDSON; SMIT, 2005), entretanto as temperaturas ótima ou máxima não são consideradas para esses cálculos. No modelo, a fenologia da cultura é dependente do acúmulo de graus-dia (GD, ºC dia).

Quanto à emergência dos perfilhos, a qual ocorre na fase de germinação da cultura, cuja fase vai do plantio ou corte até a emergência, se dá pelo acúmulo de tempo térmico a partir do plantio (TTPLNTEM) ou do corte (TTRATNEM), sendo que esse é o único fator de distinção entre cana planta e soca (rebrota). O início da elongação dos colmos é simulado a partir do acúmulo de tempo térmico específico (CHUPIBASE) posterior ao surgimento dos perfilhos iniciais, sendo que o pico de perfilhamento é alcançado quando um tempo térmico específico é acumulado desde a emergência (TT_POPGROWTH). Na simulação pelo modelo, a fase de perfilhamento vai da emergência dos perfilhos primários até o pico de perfilhamento, sendo que o período de crescimento dos colmos ocorre do início da elongação dos colmos até a colheita. Enfim, a fase de senescência dos perfilhos inicia-se após o pico de perfilhamento e segue até a colheita. Contudo, para o modelo DC ainda não há simulação do florescimento da cana-de-açúcar

Em relação ao desenvolvimento da parte aérea, o DC faz uso de um modelo de IAF (Índice de Área Foliar), o qual simula baseado no tempo térmico, o desenvolvimento de folhas individuais e dos perfilhos, a partir da extrapolação da área foliar respectiva de cada perfilho para o nível de dossel pela multiplicação da área foliar individual pelo nº de perfilhos por unidade de área. Quanto à interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), essa variável é obtida conforme a Lei de Beer, a partir dos coeficientes de extinção (0,58 e 0,84) durante o período de desenvolvimento do dossel, cujos valores são variáveis em função do número de folhas formadas no colmo primário (LFNMXEXT) (INMAN-BAMBER, 1991). Já o surgimento de folhas e o perfilhamento, são função do tempo térmico, sendo determinados pelos parâmetros de cultivar e ecótipo, ao passo que a taxa de perfilhamento é inversamente proporcional ao espaçamento entre as linhas de plantio, sendo que a senescência dos perfilhos é dependente do tempo térmico e do estresse hídrico. Para o surgimento das folhas, o modelo considera os filocronos Pl1 e Pl2, cujos fatores são em função do número de folhas emergidas (PSWITCH). A senescência das folhas é influenciada pelo estresse hídrico, ocorrendo quando um limiar máximo de folhas por colmo é atingido. Em relação à expansão foliar, esta é calculada pelo modelo através da taxa de expansão da planta (PER, cm dia^{-1}) (INMAN-BAMBER, 1994). O crescimento do colmo (SGHT, cm) e do dossel (CANHEIGHT, cm) são dependentes da PER e ambas sofrem influência de parâmetros de espécies (PERcoeff e CHTCoeff) em seus cálculos (SINGELS, A.; JONES., M; VAN DER BERG, 2008).

Quanto ao processo de acúmulo de biomassa, sua simulação é descrita por SINGELS E BEZUIDENHOUT (2002). Sendo que o incremento diário na biomassa total (dTOT/dt, em t ha^{-1} dia^{-1}) é determinado a partir da eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa (PARCE, em g

MJ^{-1}), da quantidade de radiação interceptada (IPAR, em MJ ha^{-1}), bem como do tamanho da planta (TOT, t ha^{-1}), de gastos com respiração de manutenção (Rm) e crescimento (Rc), além do nível de estresse hídrico (SWDF1, adimensional). A Rm (adimensional) e a PARCE são parâmetros influenciados pela temperatura do ar (SINGELS, A.; JONES., M; VAN DER BERG, 2008). Sendo que, a Rm foi derivada do trabalho de LIU E BULL (2001), cujo parâmetro varia exponencialmente conforme a temperatura do ar, contando que essa variação é realizada em função de uma temperatura de referência de 10 ºC (INMAN-BAMBER, 1991). Já a Rc, é considerada um parâmetro de espécie, possuindo um valor constante de 0,242 t t^{-1} (INMAN-BAMBER, 1991).

Ao se tratar da partição dos fotoassimilados entre raízes e a parte aérea, esta é simulada por uma função na qual a fração máxima de incremento diário da biomassa particionada para a parte aérea e para a raiz é especificada em parâmetros de cultivar e espécie. Sendo que a fração do incremento particionado em relação à parte aérea é dependente do tempo térmico e de um valor máximo específico para a cultivar. Já partição da massa seca entre os tecidos estruturais do colmo e o acúmulo de sacarose é condicionada através das condições de crescimento, relacionadas à temperatura e água, bem como da massa de colmo atual e características da cultivar (SINGELS; BEZUIDENHOUT, 2002). Em relação ao crescimento das raízes, há um algoritmo o qual é expresso em termos de profundidade de raízes, além do aumento da massa radicular, bem como do comprimento das raízes respectivo à cada camada do solo. O potencial de penetração das raízes no solo é 2,2 mm por unidade de ºC dia no dia, até que se atinja a profundidade máxima do sistema radicular. Assume-se que são perdidas por dia, devido à respiração e senescência, 0,5% da densidade de comprimento de raiz.

A absorção hídrica máxima de água pelas raízes é um parâmetro da espécie, sendo limitado a 0,07 cm^3 cm^{-1} (VAN ANTWERPEN, 1998), sendo que o sistema radicular combinado com as condições hídricas do solo condiciona a extração de água pela planta e são usados posteriormente para a determinação do nível de estresse hídrico (SWDF1 e SWDF2) (RITCHIE, 1998). Ao se tratar do balanço hídrico do solo, no modelo é descrito por RITCHIE (1998), cujo processo exerce influência em quase todos os processos de crescimento e desenvolvimento da cultura. A evapotranspiração potencial (ETo) é estimada pelo método Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), contudo pode ser adotado o método de PRIESTLEY E TAYLOR (1972). Enfim, em relação aos aspectos de ordem nutricional, o modelo DC, não simula o balanço de nitrogênio, dessa forma nas simulações da produtividade não há restrições de quanto à nutrição da cultura.

Tabela 1. Parâmetros de espécie do modelo DSSAT/CANEGRO, suas unidades e descrições

Parâmetro	Unidade	Descrição
Tbasephotos	°C	Temperatura base para fotossíntese
Critsw	-	Limiar de estresse hídrico para impacto prolongado de estresse na fotossíntese
HuRecover	°C dia	Graus-dia requerido para total recuperação da fotossíntese após estresse hídrico severo
RespQ10	-	Aumento da fração na taxa de respiração por 10°C de aumento na temperatura (coeficiente Q10)
RespGcf	-	Fração da fotossíntese bruta perdida na respiração para o crescimento
PCB	-	Coeficiente de partição: coeficiente de extinção da fração de incremento de massa seca, alocada para a biomassa acima do solo
Max_rootpf	-	Fração da partição máxima do incremento da massa diária às raízes
FTCON	-	Parâmetro de particionamento de sacarose que determina o tempo de resposta de mudanças na partição entre sacarose e fibra devido a mudanças ambientais
RTcmpg	cm g^{-1}	Comprimento radicular por massa de raiz
Wrk	-	Coeficiente de densidade de comprimento radicular por profundidade
RLVmin	cm cm^{-3}	Densidade de comprimento radicular mínimo nas camadas do solo
Senes F	n° folhas	Número de folhas senescentes por colmo por 100 dias de estresse
Reset	mm	Chuva requerida para recompor o contador de dias de estresse
Percoeff	-	Fração do crescimento da planta atribuído ao alongamento do colmo
CHTCoeff	cm cm^{-1}	Coeficiente de determinação da altura do dossel em função da altura do colmo e número de folhas
Hillpar 1	-	Função empírica do parâmetro de forma
EORATIO	-	Relação da evapotranspiração de um dossel completamente formado e sem restrições hídricas de cana-de-açúcar comparado com a evapotranspiração de referência da grama (kc)
RWUEP1	-	Taxa limite de suprimento de água no solo/evaporação potencial, abaixo da qual a evaporação e fotossíntese são limitadas
RWUEP2	-	Taxa limite de suprimento de água no solo/evaporação potencial, abaixo da qual o crescimento é limitado
RWUMX	cm^3 água cm^{-1} raiz	Absorção máxima de água por unidade de comprimento da raiz
LG_RATING	-	Pontuação de acamamento quando a cultura está totalmente acamada
LG_CRIT_WIND	km dia^{-1}	Limite do vento para o acamamento

Fonte: Adapatado de SINGELS et al. (2008)

Tabela 2. Parâmetros de ecótipo do modelo DSSAT/CANEGRO, suas unidades e descrições

Parâmetro	Unidade	Descrição
DELTTMAX	t^{-1}	Variação máxima do teor de sacarose por unidade de variação da massa do colmo na seção imatura do caule
SWDF2AMP	-	Sensibilidade de particionamento da sacarose ao estresse hídrico
CS_CNREDUC	-	Redução máxima da fração do dossel devido ao estresse hídrico
CS_CNPERIOD	dias	Período de estresse hídrico requerido para ter o maior efeito na redução do dossel
Tthalfa	°C dia m^{-1}	Graus-dia necessário para o dossel ajustar-se à metade da largura da linha
dPERdt	mm h^{-1} °C^{-1}	Mudança na taxa de crescimento da planta por unidade de temperatura efetiva
EXTCFN	-	Máximo Coeficiente de extinção de radiação do dossel
EXTCFST	-	Mínimo Coeficiente de extinção de radiação do dossel
LFNMXEXT	n° folhas	Número de folhas (incluindo folhas mortas ainda fixadas) onde ocorre a máxima extinção da radiação
AREAMX_CF(1)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima área foliar (y=cf1+cf2*x+cf3*x2)
AREAMX_CF(2)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima área foliar
AREAMX_CF(3)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima área foliar
WIDCOR	-	Parâmetro que influencia a largura das folhas
WMAX_CF(1)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por número de folhas
WMAX_CF(2)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por número de folhas
WMAX_CF(3)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máxima largura de folhas por número de folhas
LMAX_CF(1)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por número de folhas
LMAX_CF(2)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por número de folhas
LMAX_CF(3)	-	Parâmetro de cultivar para equação quadrática definindo a máximo comprimento de folhas por número de folhas
MAXLFLENGHT	cm	Máximo comprimento absoluto de folha
MAXLFWIDTH	cm	Máxima largura absoluta de folha
POPCF(1)	-	Coeficiente de população de colmo, em condições ideais, em função de graus dia
POPCF(2)	-	Coeficiente de população de colmo, em condições ideais, em função de graus dia
POPDECAY	-	Fração de perfilhos sobre a população madura (com 1600 ºCd), que senescem por unidade de graus dia
TTBASEEM	°C	Temperatura base para emergência e início da elongação do colmo
TTBASELFEX	°C	Temperatura base para fenologia de folha
TTBASEPOP	°C	Temperatura base para fenologia de colmos
TBASEPER	°C	Temperatura base para extensão da planta
LG_AMRANGE	t ha^{-1}	Variação na massa da parte aérea do início ao final do acamamento
LG_GP_REDUC	-	Redução na fotossíntese bruta devido ao acamamento total, como fração
LG_FI_REDUC	-	Redução na fração de interceptação do dossel devido ao acamamento completo

Fonte: Adaptado de SINGELS et al. (2008)

Tabela 3. Parâmetros de cultivar do modelo DSSAT/CANEGRO, suas unidades e descrições

Parâmetro	Unidade	Descrição
PARCEmax	g MJ^{-1}	Máxima eficiência na conversão de radiação expressa em assimilados produzidos antes da respiração, por unidade de PAR
APFMX	t t^{-1}	Fração máxima de incremento de massa seca que pode ser atribuído a massa seca da parte aérea
STKPFMAX	t t^{-1} base massa seca	Fração do incremento diário de massa seca aérea particionada para o colmo em altas temperaturas em uma cultura madura
SUCA	t t^{-1}	Parâmetro de particionamento de sacarose: máxima sacarose contida na base do colmo
TBFT	°C	Particionamento de sacarose: temperatura em que o particionamento de incremento de massa de colmo sem estresse para sacarose é 50% do valor máximo
Tthalfo	°C dia	Graus-dia para que o desenvolvimento do dossel atinja metade do espaçamento
Tbase	°C dia	Temperatura base para o desenvolvimento do dossel
LFMAX	n° folhas	Número máximo de folhas verdes saudáveis, plantas adequadamente irrigadas serão velhas o suficiente para perderem folhas após este número
MXLFAREA	cm^2	Área foliar máxima atribuída a todas as folhas sobre o número de folhas MXLFARNO (cm^2)
MXLFARNO	n° folhas	Número de folhas sobre o qual é limitado pelo MXLFAREA
Pl1	°C dia	Intervalo de filocrono 1 (para número de folhas abaixo do Pswitch)
Pl2	°C dia	Intervalo de filocrono 1 (para número de folhas acima do Pswitch)
PSWITCH	n°	Número da folha em que há mudança no filocrono
MAX_POP	colmos m^{-2}	População de perfilhos máxima
POPTT16	colmos m^{-2}	População de colmos após 1600 graus-dia
TTPLNTEM	°C dia	Graus-dia para emergência da cana-planta
TTRATNEM	°C dia	Graus-dia para emergência da soqueira
CHUPBASE	°C dia	Graus-dia para o início do crescimento do colmo
TT_POPGROWTH	°C dia	Graus-dia para ocorrer o pico do perfilhamento
LG_AMBASE	t ha^{-1}	Massa da parte aérea (colmo, folhas e água) onde ocorre o início do acamamento

Fonte: Adaptado de SINGELS et al. (2008)

2.2.2. Simulação da produtividade atingível

Foram simulados dados Yw da cana-de-açúcar para a estimativa do Yg e da Ef, no presente estudo, o modelo DC foi utilizado para a simulação da Yw usando os dados da cultivar RB86-7515 (Tabela 4), anteriormente calibrados por MARIN et al., (2015), cujos dados foram coletados de sete experimentos localizados pelo Brasil e conduzidos por muitos anos através de um ampla gama de tipos de solos e diferentes climas representativos das principais regiões produtoras do Brasil. Dentre os sete experimentos conduzidos, o cultivo de cana-de-açúcar foi realizado com técnicas de manejo adequadas, ou seja, sem limitações de crescimento devido à deficiências nutricionais e estresse biótico causado por pestes e doenças. Sendo que os rendimentos obtidos por esses experimentos foram muito próximos de Yw para cada local, bem como representativos através dos anos nas principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do Brasil. Além disso, após a calibração o modelo DC atingiu uma boa reprodução do desenvolvimento da cana de açúcar e os dados de produtividade observados na colheita,

com alcance de 77 a 152 Mg ha^{-1}, apresentaram concordância com os valores projetados pelo DC (RMSE = 16,5 Mg ha^{-1}), sendo este nível de erro médio quadrado observado por outros autores em avaliação de modelos de crescimento de cana-de-açúcar em estudos anteriores (KEATING et al., 1999; O'LEARY, 2000; SINGELS; BEZUIDENHOUT, 2002).

Tabela 4. Valores dos parâmetros para a cultivar padrão do modelo DSSAT/CANEGRO (NCo376) e para calibração da cultivar brasileira RB86-7515

Parâmetro	NCo376[1]	RB86-7515[2]
PARCEmax	9,9	9,9
APFMX	0,88	0,88
STKPFMAX	0,65	0,65
SUCA	0,58	0,58
TBFT	25	25
Tthalfo	250	250
Tbase	16	16
LFMAX	12	10
MXLFAREA	360	594
MXLFARNO	15	18
Pl1	69	89
Pl2	169	107
PSWITCH	18	18
MAX_POP	30	16
POPTT16	13,3	10
TTPLNTEM	428	408
TTRATNEM	203	203
CHUPBASE	1050	547
TT_POPGROWTH	600	628

[1]SINGELS et al.(2008); [2]MARIN et al.(2015)

Utilizou-se uma série de dados meteorológicos obtidos de um total de 6 estações meterológicas de referência (EMR) da usina, cada série consistia em dados de chuva, temperatura máxima e minima do ar, além de radiação solar global. A área de abrangência das estações foi determinada pela sua proximidade à cada talhão associando-se um arquivo *shapefile* com a distribuição dos talhões e dos pontos referentes às estações meteorológicas a partir da ferramenta *measure* disponível no ArcGIS 10.5/ArcMap®, totalizando um grupo de 6 áreas de abrangência (Tabela 5).

Para a configuração dos solos em cada área de abrangência, cruzou-se as informações de disponíveis na base de dados fornecida pela usina parceira com os elementos do mapa da usina. Assim, com esse procedimento, pôde-se identificar quais solos e ambiente de produção (PRADO, 2005) ocorrem com maior predominância nas áreas abrangidas por cada EMR. Apesar da predominância de certos tipos de solo, os talhões apresentam alta variabilidade de solos, portanto, conferindo grande diversidade de ambientes de produção de cana-de-açúcar entre os talhões.

Tabela 5. Estações meteorológicas de referência e seus códigos associados, características de clima e solo predominantes e a área de abrangência de cada estação.

Estação meteorológica	Solos predominantes	Ambiente de produção	Tmáx (C°)	Tmín (°C)	P (mm)	Elevação (m)	Área de abrangência (ha)
EMR 1	NVLe mt arg[1]	A	28,2	16,1	1271	619	7244
EMR 2	LVal mt arg[2]	E	28,2	16,1	1175	562	5955
EMR 3	LVPal ar/md-ar[3]	D	28,2	16,1	1279	769	1811
EMR 4	NVLe mt arg[4]	A	28,2	16,1	1211	519	3909
EMR 5	LVPd md/md-arg[5]	C	28,3	16,5	1275	866	906
EMR 6	LVPal ar/md-ar[6]	D	28,3	16,5	1312	506	9647

Nitossolo Vermelho Eutrófico Latossólico textura muito argilosa[1]; Latossolo Vermelho Álico muito argiloso[2]; Latossolo Vermelho Argissóilico Álico textura arenosa/média-arenosa[3]; Nitossolo Vermelho Eutrófico Latossólico textura muito argilosa[4]; Latossolo Vermelho Distrófico Argissólico textura média/média-argilosa[5]; Latossolo Vermelho Argissóilico Álico textura arenosa/média-arenosa[6]

Quanto à configuração de manejo da cultura em cada local, foram simulados ciclos de cana planta e cana soca de acordo com as épocas de cada respectivo talhão disponíveis na base de dados fornecida pela usina. Os dados de adubação, padrões de plantio, quantidade de cortes, foram devidamente cadastrados de modo a representar canaviais comerciais da usina crescendo sem limitação.

2.2.3. Determinação e mapeamento da eficiência agrícola e *yield-gap*

O Yg para cada talhão foi determinado pela diferença entre a Yw e aYa (Equação 1), já a Ef é a relação entre a Ya e a Yw (Equação 2). Os valores foram calculados a partir da média obtida no período de 5 anos (2013 – 2017).

$$Yg = Yw - Ya \tag{1}$$

$$Ef = Ya\, Yw^{-1} \tag{2}$$

Para a representação espaço-temporal dos dados de Ef e Yg primeiramente foram combinados os dados determinados com o arquivo em formato *shapefile* da área da usina referente a todos talhões adquiridos por ela no período de 2013 a 2017 pelo ArcGIS 10.5/ArcMap® no DATUM WGS84. A partir disso foi realizado o mapeamento de cada talhão com seu respectivo valor, bem como a representação espacial de seu coeficiente de variação expresso em porcentagem (CV%), permitindo avaliar como a variabilidade dos dados oscila em relação ao tempo, sendo que para os talhões recentemente adquiridos pela usina (ano de 2017) que apresentaram CV% igual a zero foram retirados da análise. Além dos dados de Ef e Yg, a representação espaço-temporal foi realizada para a Ya e Yw. Em adição foi determinado intervalo dos resultados, o qual consiste no menor e maior valor da gama dos dados obtidos.

2.3. Resultados

2.3.1. Representação espaço temporal da eficiência agrícola

A Ya dos talhões apresentou intervalo de 30,1 a 133,7 Mg ha^{-1} e os dados de maior frequência relativa (FR=20%) estão compreendidos entre 67,1 e 74,5 Mg ha^{-1} (Figura 1). A Ya máxima atingida foi em torno de 133,0 Mg ha^{-1} com FR de 1%, enquanto o valor mínimo observado foi de 30,1 Mg ha^{-1} e FR de 2%. De foma geral, os talhões localizados na parte central e nordeste apresentaram Ya menor (30,1 a 80,8 Mg ha^{-1}) se comparados às outras localidades da usina. A região com maior concentração de talhões de altas produtividades (80,8 a 133,7 Mg ha^{-1}) se localizam na parte noroeste da usina, cuja região apresenta em sua maioria, solos com ambiente de produção de A a C. Já os talhões com produtividade menores que 80,8 Mg ha^{-1} se concentram em solos de ambiente de produção de D e E. Para o CV% de Ya, observou-se um intervalo de 3,96 a 55,40%, além disso os talhões de CV% na faixa de 11,87 e 15,83% ocorreram maior número de vezes (FR=18%). Os talhões de CV% máximo e mínimo, apresentaram FR de 0,12% e 8%, respectivamente (Figura 2).

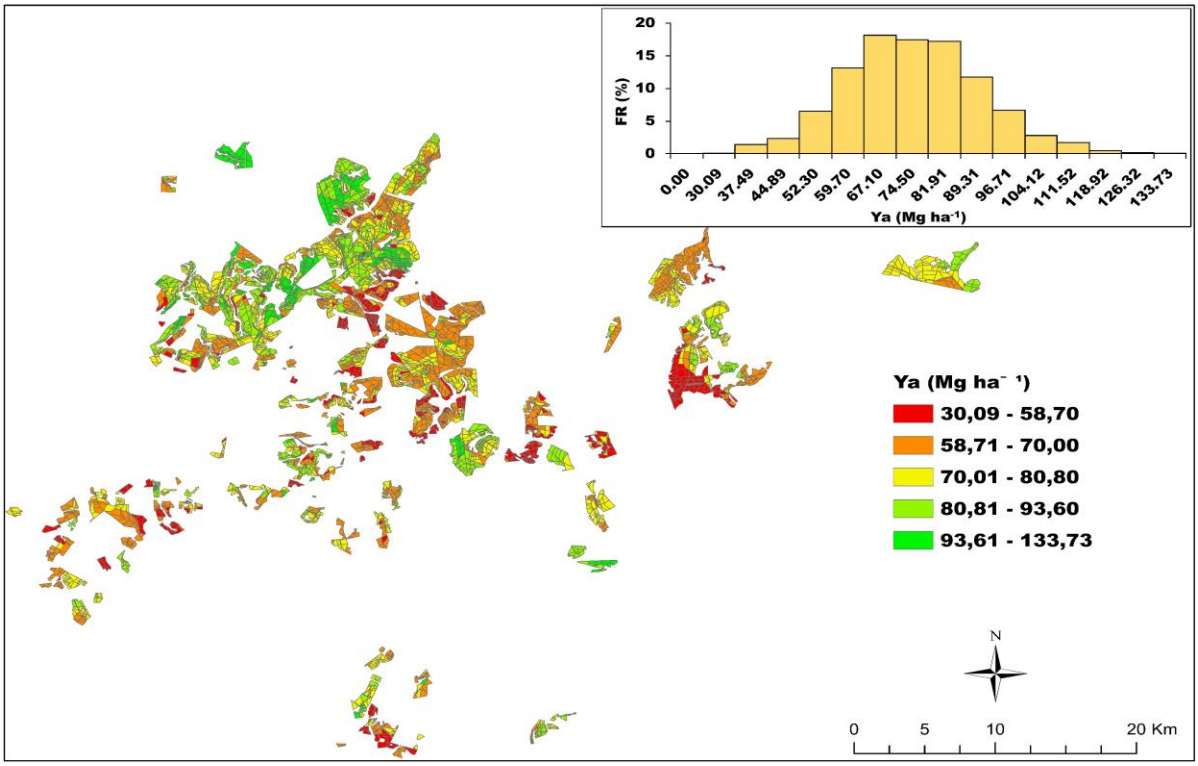

Figura 1. Mapa da variação espacial da produtividade média atual (Ya; em megagramas [Mg] por hectare [ha]) e distribuição de frequência de valores de Ya nos talhões comerciais de cana-de-açúcar no período de 2013 a 2017.

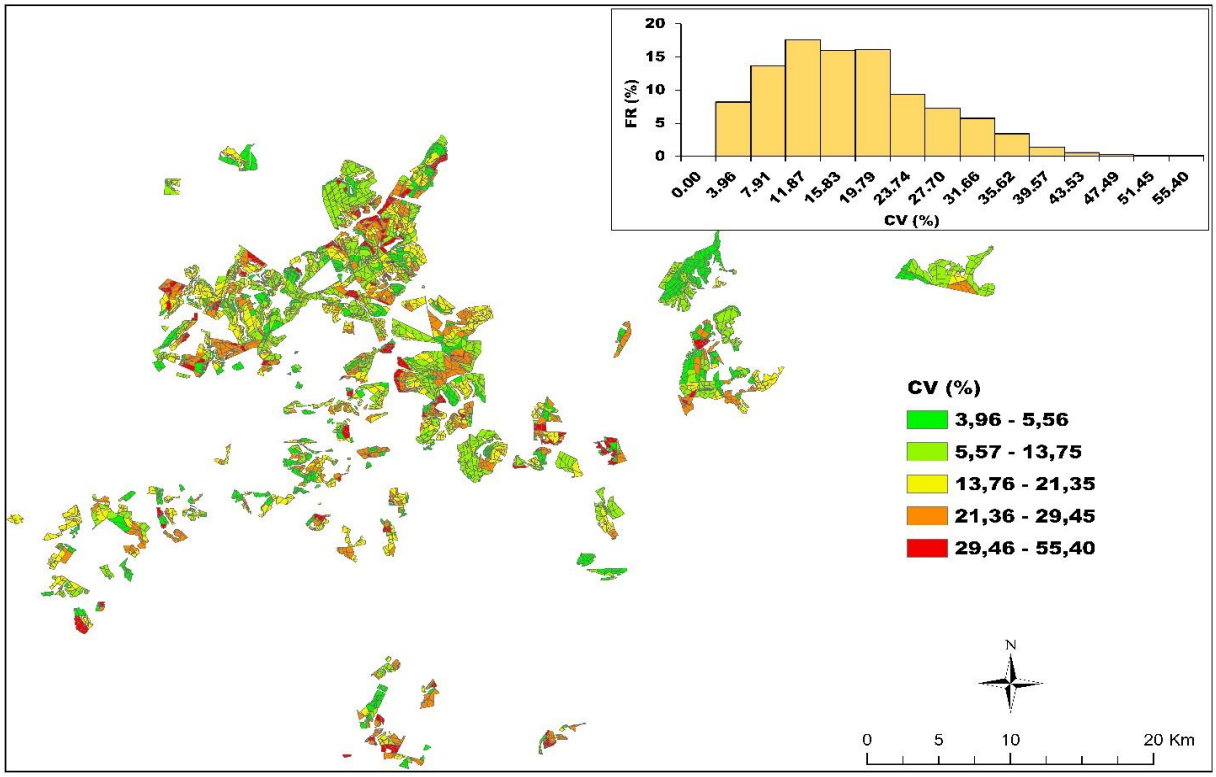

Figura 2. Mapa da variação no tempo (CV%) da produtividade média atual e distribuição de frequência dos valores de CV% nos talhões comerciais de cana-de-açúcar no período de 2013 a 2017.

A média de Yw para cana-de-açúcar na usina foi de 103,0 Mg ha^{-1} em um intervalo de 48,4 a 139,4 Mg ha^{-1} (Figura 3). A magnitude de Yw foi de 106,9 a 113,4 Mg ha^{-1} e apresentou maior FR (15%), já a Yw de 48,4 a 86,4 Mg ha^{-1} foi encontrada em menos de 5% dos talhões. Na região norte–nordeste da usina foram encontrados em sua maioria, talhões com Yw no intervalo entre 48,4 a 106,0 Mg ha^{-1}. A Yw máxima atingida (139,4 Mg ha^{-1}) foi encontrada em apenas 1% dos talhões.

No que diz respeito ao CV% dos dados de Yw, observou-se magnitude de 1,87 a 26,21%, sendo que o CV% máximo atingido foi encontrado em 13% dos talhões. Já 3% dos talhões apresentaram o menor CV% (1,87%), evidenciando estabilidade temporal (Figura 4).

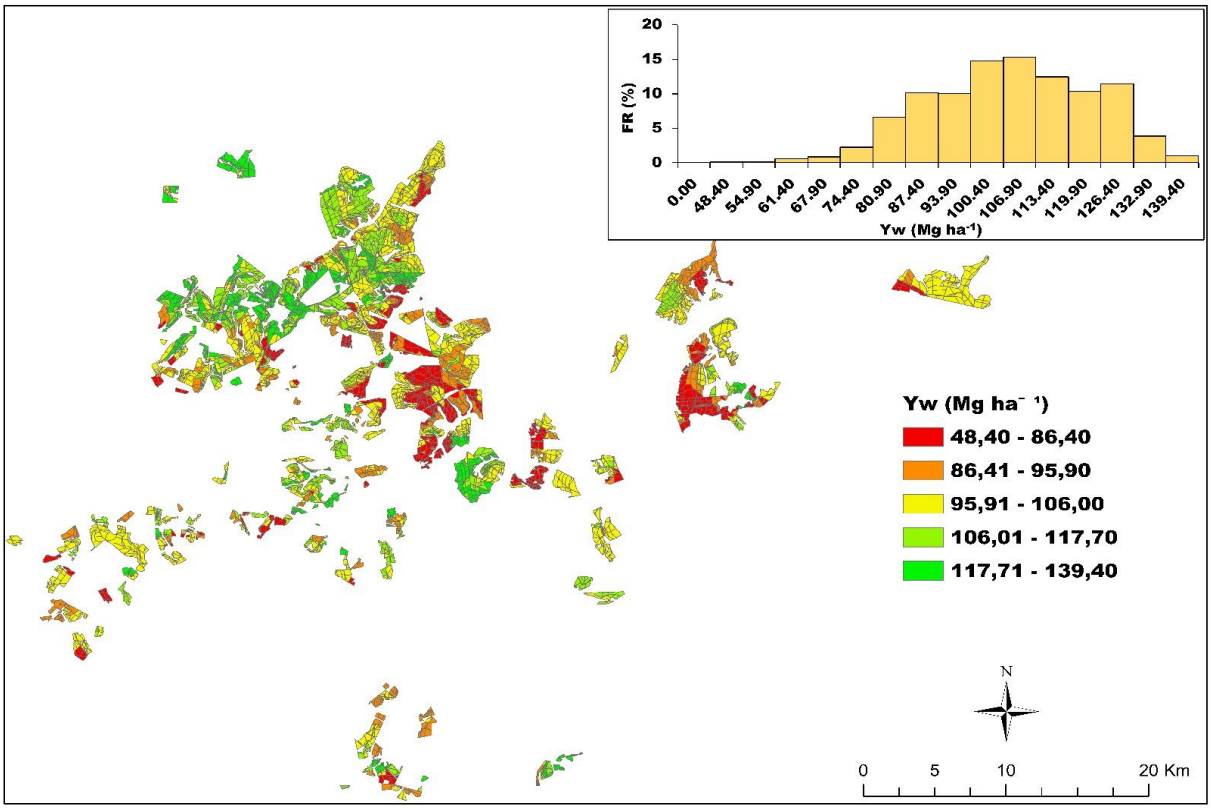

Figura 3. Mapa da variação espacial da produtividade atingível (Yw; em megagramas [Mg] por hectare [ha]), e distribuição de frequência de valores de Yw nos talhões comerciais de cana-de-açúcar no período de 2013 a 2017.

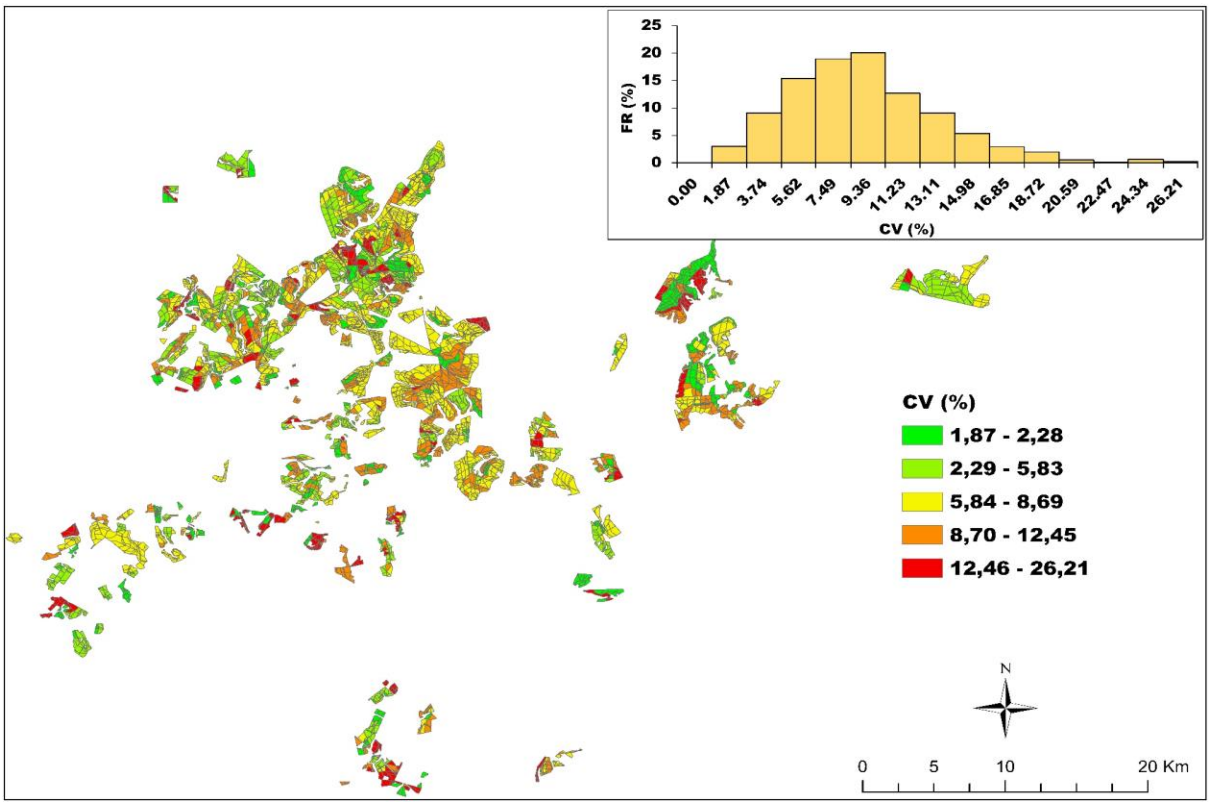

Figura 4. Mapa da variação no tempo (CV%) da produtividade atingível e distribuição de frequência dos valores de CV% nos talhões comerciais de cana-de-açúcar no período de 2013 a 2017.

A média do Yg dos talhões é de 31,1 Mg ha^{-1}, o qual representa 30% de Yw e 48% menor que a Yg das principais regiões produtoras de cana-de-açúcar do estado de São Paulo, cuja média é em torno de 79,3 Mg ha^{-1}. A magnitude de Yg apresentou intervalo de 0,1 a 102,3 Mg ha^{-1}, sendo que os valores de 29,3 a 36,6 Mg ha^{-1} ocorreram com maior frequência (FR=23%). O Yg mínimo e máximo apresentaram FR de 0,01% e 0,05%, respectivamente (Figura 5).

A amplitude de CV% foi de 10,22 a 143,07%, apresentando alta magnitude de Yg. O máximo CV% ocorreu em uma FR de 0,2% e o CV % mínimo apresentou FR de 6%. A maior FR (18%) foi observada em talhões com CV% de 51,10 a 61,32% (Figura 6).

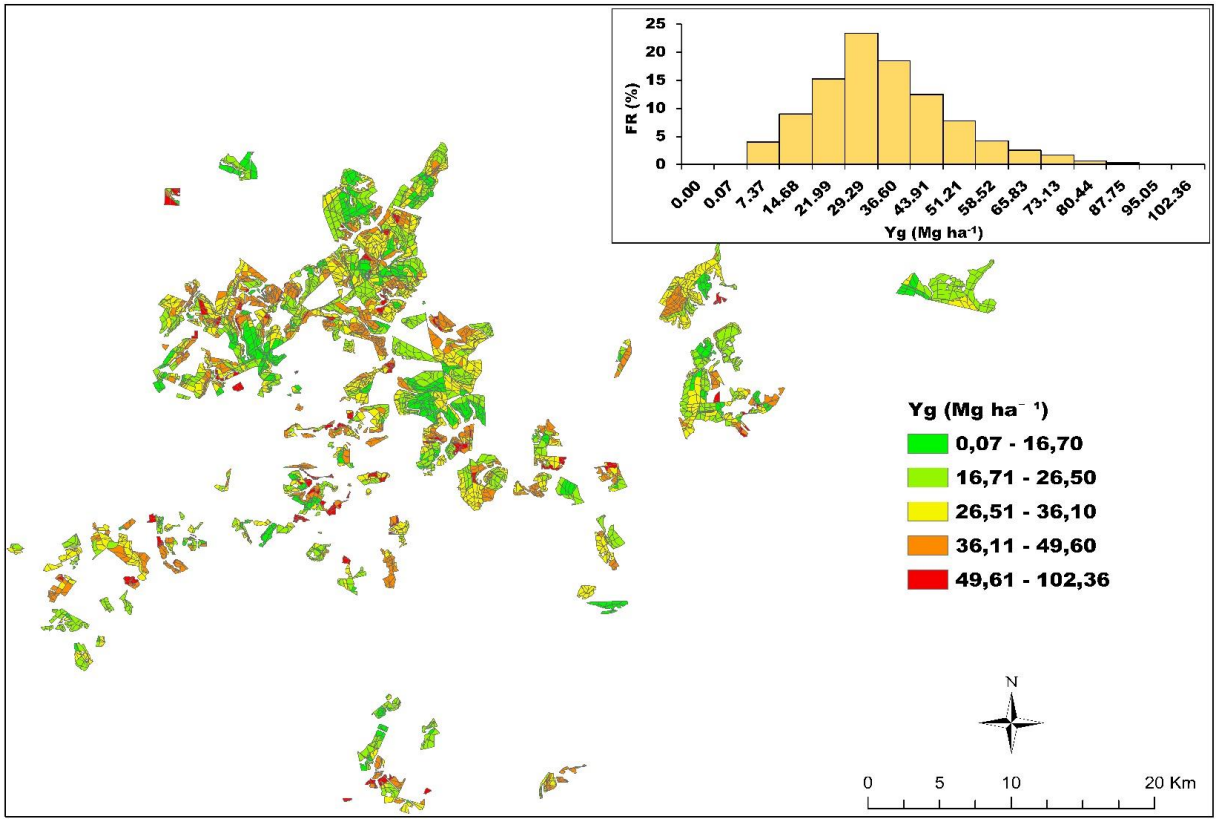

Figura 5. Mapa da variação espacial do *yield – gap* (Yg; em megagramas [Mg] por hectare [ha]) e distribuição de frequência de valores de Yg nos talhões comerciais de cana-de-açúcar no período de 2013 a 2017.

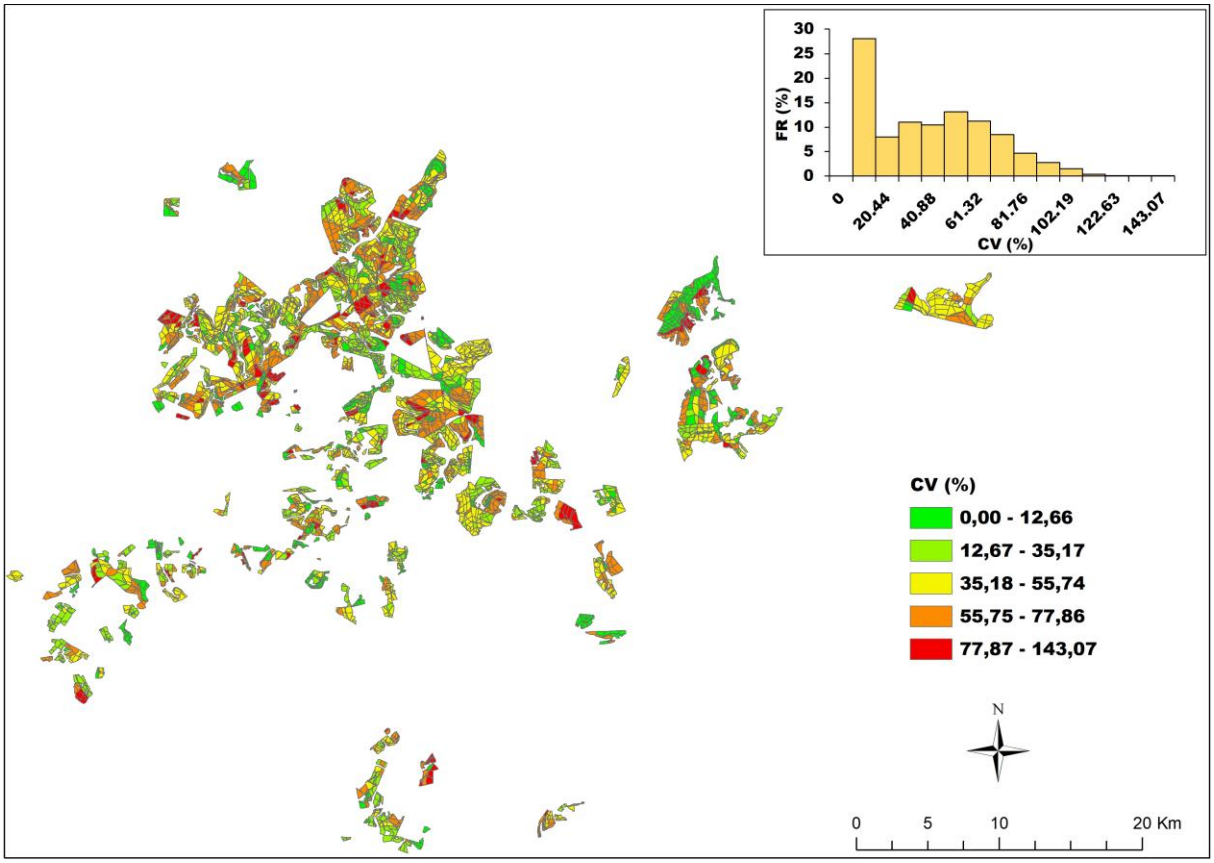

Figura 6. Mapa da variação no tempo (CV%) do *yield-gap* e distribuição de frequência dos valores de CV% nos talhões comerciais de cana-de-açúcar no período de 2013 a 2017.

Para as classes de Ef entre 20 e 80% houve um aumento de área ao longo das safras, indicando intensificação no uso dessas áreas. Entretanto, as áreas de Ef maior que 80% reduziram de 10.712 a 10.650 ha (Tabela 6). Cada aumento de 1% de Ef representa um aumento de 0,8 Mg ha^{-1} na produtividade.

Tabela 6. Classes de eficiência agrícola de cana-de-açúcar e área útil da usina (ha) ocupada por cana-de-açúcar do período de 2013/2014 a 2017/2018

Safra	Classe de eficiência			
	0,2-0,4	0,4-0,6	0,6-0,8	0,8-1,0
2013/2014	438	2.871	8.899	10.712
2014/2015	1.515	10.861	13.360	10.022
2015/2016	525	4.502	8.845	10.095
2016/2017	912	7.291	11.097	10.006
2017/2018	1.015	7.528	16.207	10.650

No geral a Ef média da usina foi 70%, diminuindo de 76% para 70% através do período analisado. Na safra de 2014/2015 os talhões apresentaram Ef em torno de 68%, cujo valor foi 2% abaixo da média. Ocorreu um declínio de 4% na Ef entre o período de 2015 a 2017, além disso houve uma variação substancial de valores em torno de 0,26 a 1,00 de Ef. Os talhões de 0,74 a 0,79 de Ef

apresentaram maior FR (18%) e o valor mínimo de Ef apresentou FR de 0,01%, enquanto o valor máximo apresentou FR de 2% (Figura 7). Em relação aos valores de CV%, observou-se um intervalo de 3,97% a 55,65%. Para o valor mínimo e máximo de CV% foram obtidas FR de 7,50% e 0,10%, respectivamente (Figura 8)

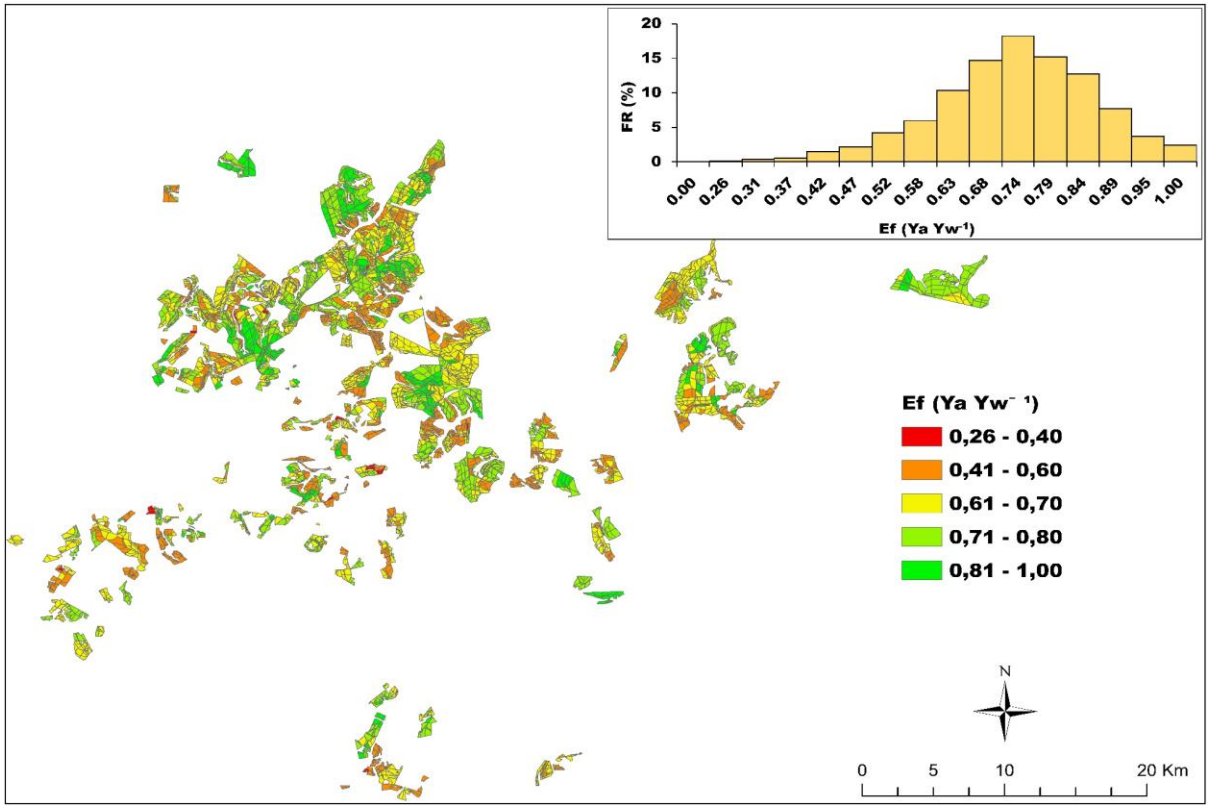

Figura 7. Mapa da variação espacial da eficiência agrícola (Ef - relação entre produtividade média atual [Ya] e produtividade média atingível [Yw]) e distribuição de frequência de valores de Ef nos talhões comerciais de cana-de-açúcar no período de 2013 a 2017.

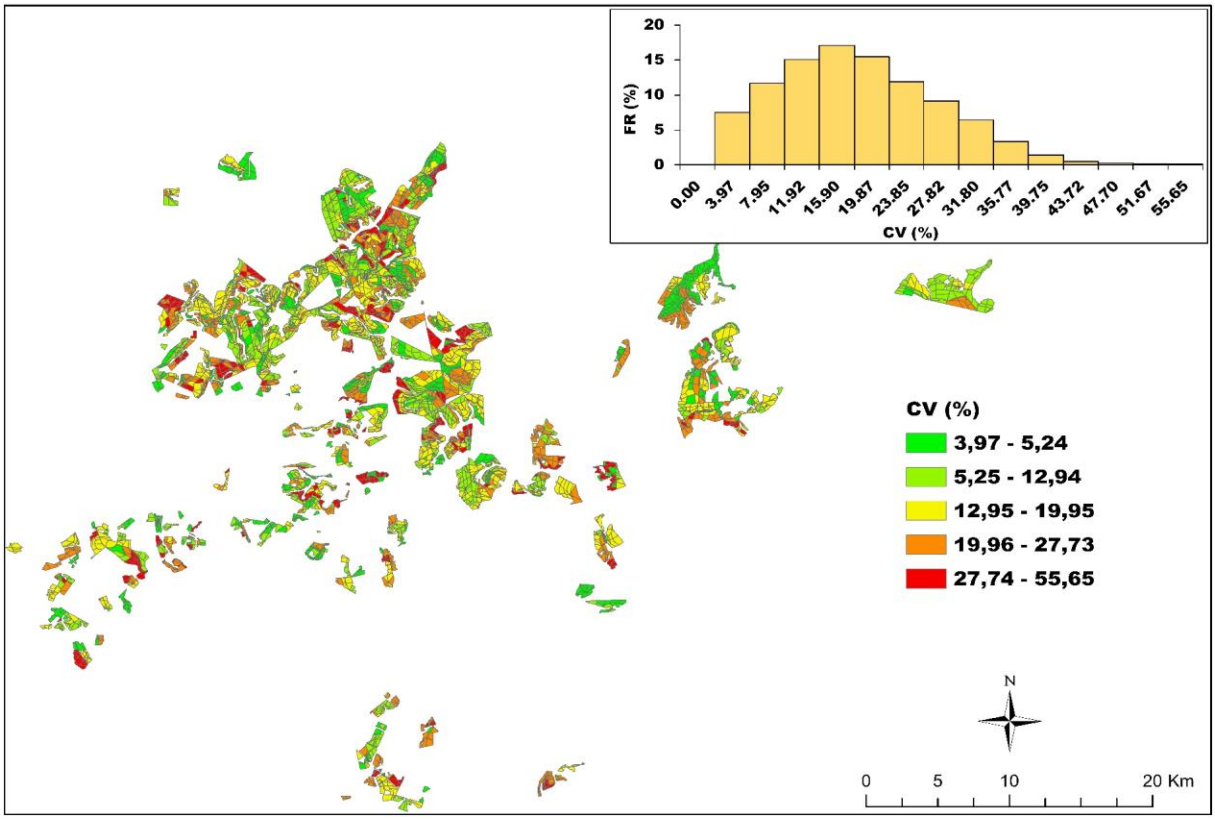

Figura 8. Mapa da variação no tempo (CV%) interanual da eficiência agrícola e distribuição de frequência relativa dos valores de CV% nos talhões comerciais de cana-de-açúcar no período de 2013 a 2017.

Os resultados de CV% para Ya, Yw, Yg e Ef também foram representados graficamente, nos quais foram divididos em quadrantes representando o valor médio dos resultados (Figura 9). Dessa forma, o quadrante I representa talhões de CV% abaixo da média, bem como os valores das variáveis de Ya, Yw, Yg e Ef. Já os talhões localizados no quadrante II, representam CV% acima da média, entretanto valores de Ya, Yw, Yg e Ef inferiores à média. Enfim, os talhões dos quadrantes III e IV representam valores de Ya, Yw, Yg e Ef acima da média, entretanto o quadrante III e IV, indicam CV% acima e abaixo da média, respectivamente

Observa-se uma relação inversa entre a Ya, Yg e Ef e seus respectivos CV% associados (Figura 9A), de modo que para cada tonelada por hectare de Ya o seu CV% diminui em 0,14% (Figura 9A), sendo que o mesmo se observa para a Yw, apresentando queda do valor de CV% em torno de 0,09% (Figura 9B), bem como para cada tonelada por hectare de Yg e 1% de Ef ocorre declínio de CV% de 0,76% e 29%, respectivamente (Figuras 9C e 9D). Cada ponto representa um talhão comercial de cana-de-açúcar entre o período de 2013 a 2017. A a linha sólida representa o ajuste da equação e o valor de *p* indica a significância estatística para a hipótese nula de b=0. Assim, para todas as regressões, o valor de *p* é significativo (p <0,001), o que implica na rejeição da hipótese nula e comprova a significância estatística.

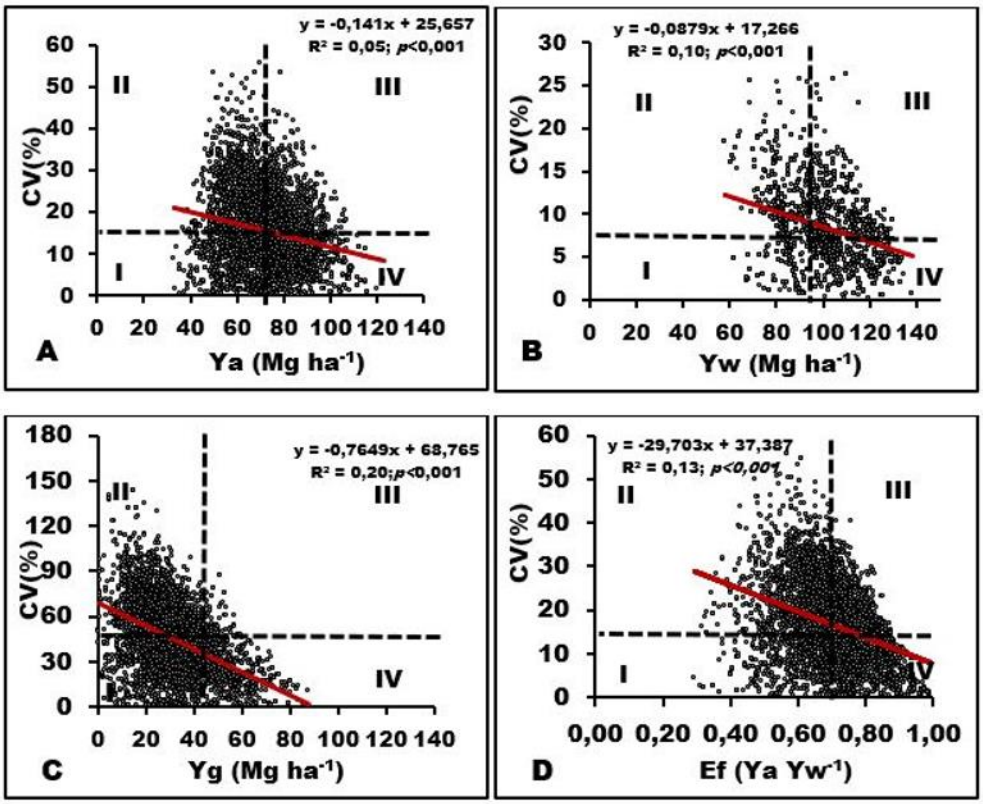

Figura 9. (A) A relação entre a média de produtividade atual (Ya), (B) produtividade potencial limitada por água (Yw), (C) *yield-gap* (Yg) e (D) eficiência agrícola (Ya Yw^{-1}) e seus respectivos coeficientes de variação temporal (CV%). A linha sólida representa o ajuste da regressão linear da reta, enquanto as linhas tracejadas representam os valores médios de Ya, Yw, Yg e Ef atingidas determinadas pela usina e seu CV (%) médio relacionado.

2.4 Discussão

Durante o período analisado (2013-2017), a usina em análise teve valor médio de Ya=72,0 Mg ha^{-1}, portanto cerca de 5% inferior à média estadual de 77,1 Mg ha^{-1} (IBGE, 2015). Em relação à Ef, o valor médio foi em torno de 8% menor se comparado aos resultados encontrados por DIAS (2018) para os canaviais do estado de São Paulo. Ao se tratar do Yg, os talhões contaram com uma média em torno de 47,4% inferior aos resultados encontrados por MONTEIRO (2016)

Em 45% dos talhões os valores de Yw foram abaixo da média, evidenciando principalmente a influência dos diferentes ambientes de produção na Yw, em vista de que as variáveis meteorológicas, apesar de serem fatores determinantes da Yw, não apresentam grande variabilidade dentre os talhões. Em talhões cujo valor de Yw foi acima da média e de baixa Ef, evidenciam necessidade de incremento de produtividade através de manejo cultural adequado. Contudo em talhões cujos valores de Yw e Ef foram baixo, não devem ser somente associados à um manejo inadequado, em vista da influência dos fatores não controláveis, os quais são determinantes da Yw.

Quanto à variabilidade temporal da Ef, na safra de 2014/2015 a ocorrência de valores abaixo da média pode ter sido resultado em virtude da crise hídrica ocorrida em todo o estado de São Paulo (NOBRE et al., 2016), sendo que a chuva acumulada nesse período foi em torno de 807 mm, ou seja

20% e 40% menor se comparada à safra de 2013 e às safras 2015 a 2017, respectivamente. Além disso declínio na Ef podem ter ocorrido devido às práticas de manejo, sendo que investimentos insuficientes em renovação e manutenção do canavial e o consequente envelhecimento das lavouras sem um manejo adequado, evidenciam à queda do índice de produtividade, fato igualmente ocorrido em muitas regiões do país, incluindo as principais localidades produtoras de cana nos últimos anos. MARIN et al (2019) comparando o declínio da produtividade com sucessivos cortes em talhões comerciais e em áreas com manejo adequado, mostrou que os fatores relacionados ao manejo assumem importante papel na longevidade do canavial, assim como na variabilidade da produtividade ao mesmo tempo, sugerindo que o declínio na produtividade é consequência de uma manejo inadequado para a cultura, ao invés de um atributo fisiológico inerente à ela.

Para a Ya, Yw e Ef, houve queda dos valores dessas variáveis e a sua CV% associada destacando talhões de alta produtividade e estabilidade de produção. MARIN et al. (2016) observou a mesma situação ao estudar a variabilidade interanual de Yw da cana-de-açúcar para o estado de São Paulo. Entretanto, de forma geral a Ef não apresentou estabilidade durante o período analisado, sendo que a variabilidade temporal dos dados de Ef sugere a influência de aspectos relacionados ao manejo cultural realizado nos talhões, evidenciando a necessidade de uma melhor gestão de processos nesses locais e priorização de recursos em tais processos. Em talhões que apresentaram baixa variabilidade temporal e foram ineficientes, a baixa Ef não está relacionada à fatores de manejo, logo a movimentação de recursos financeiros e humanos nessas regiões não parece ser vantajosa comercialmente.

Finalmente, em talhões que apresentam baixa variabilidade no tempo e alta Ef, evidenciam que os fatores relacionados ao manejo cultural foram realizados de maneira adequada. Além disso, nota-se talhões de alto Yg e baixa variabilidade temporal, sugerindo que nessas localidades fatores relacionados ao manejo, como falhas de plantio e danos à soqueira prejudicando a rebrota da cana-de-açúcar, influenciaram na queda da Ef ao longo dos anos 2013 a 2017. Embora a operação de plantio adotada pela usina seja em sua maioria, de forma manual, 0,65% do plantio é feito de forma mecanizada, já na operação de colheita, em 86,28% dos talhões o corte é mecanizado, sendo 13,72% dessa operação realizada de forma manual devido à dificuldade de acesso com maquinário à regiões declivosas onde estão localizados esses talhões. Admite-se a utilização do sistema mecanizado em relevos de 15 a 17% de declividade, dependendo da qualidade da sistematização do talhão e do centro de gravidade das máquinas, acima disso, por questões de estabilidade dinâmica dos equipamentos, o trabalho pode ser comprometido com riscos de tombamento (RIPOLI; RIPOLI, 2004).

Devido à grande extensão das áreas comerciais de cana-de-açúcar surge o desafio de se realizar um manejo eficiente em todos os talhões e a necessidade da identificação dos talhões os quais são prioritários para o investimento de recursos para realização de manejo de forma adequada. A partir disso surge um desafio para a usinas diante da dificuldade de mobilidade de recursos humanos e captação de recursos financeiros frente à um ambiente econômico instável. Assumindo-se um

ambiente econômico favorável ao setor canavieiro entende-se que este estudo pode oferecer uma base de análise tornar mais eficiente suas práticas de manejo e, com isso, reduzir o *Yg* nos talhões comerciais de cana-de-açúcar.

2.5 Conclusão

- Este trabalho estimou o Yg e a Ef de cana-de-açúcar em uma escala espacial detalhada usando dados na escala de talhão de uma unidade sucroenergética comercial do estado de São Paulo.

- Os resultados sugerem que apesar da usina apresentar eficiência agrícola acima da média brasileira, ela possui potencial de incremento da produtividade dos canaviais, evidenciado pelo amplo intervalo de Yg entre os talhões.

- Elevar a taxa de ganho de produtividade na cana-de-açúcar é a chave para minimizar a demanda por novas áreas para cultivo de cana-de-açúcar.

- Os resultados desse estudo podem ajudar com informações para priorização de investimentos para atender as demandas de cana-de-açúcar no mercado sucroenergético.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, 1998.

DIAS, H. B. Intercomparação de modelos de simulação da cana-de-açúcar e seu uso na avaliação da quebra de produtividade e dos impactos da irrigação em diferentes regiões do Brasil. Piracicaba, São Paulo. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2016.

DIAS, H. B.; SENTELHAS, P. C. Sugarcane yield gap analysis in Brazil – A multi-model approach for determining magnitudes and causes. Science of the Total Environment, v. 637–638, p. 1127–1136, 1 out. 2018.

DOURADO-NETO, D. et al. Princípios de modelagem e simulação: I. uso de modelos matemáticos em agricultura. Scientia Agricola, v. 55, n. Special Issue, p. 46–50, 1 ago. 1998.

HOOGENBOOM, G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications. Agricultural and Forest Meteorology. Anais...1 jun. 2000.

[IBGE] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatítica. 2015. Dinâmica Territorial da Produção Agropecuária. Acesso em: 2019-09-20. https:// www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/analises-do-territorio/

INMAN-BAMBER, N. G. A growth model for sugar-cane based on a simple carbon balance and the CERES-Maize water balance. South African Journal of Plant and Soil, v. 8, n. 2, p. 93–99, 1 jan. 1991.

INMAN-BAMBER, N. G. Temperature and seasonal effects on canopy development and light interception of sugarcane. Field Crops Research, v. 36, n. 1, p. 41–51, 1994.

INMAN-BAMBER, N.; THOMPSON, G. Models of dry matter accumulation by sugarcane. Proceedings of the South African Society of Sugar Technologists, v. 63, 1 jan. 1989.

JONES, C.A., KINIRY, J. R. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, p. 194, 1986.

JONES, J. et al. The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy, v. 18, n. 3–4, p. 235–265, 1 jan. 2003.

JONES, M. R.; SINGELS, A.; RUANE, A. C. Simulated impacts of climate change on water use and yield of irrigated sugarcane in South Africa. Agricultural Systems, v. 139, p. 260–270, 1 out. 2015.

KEATING, B. A. et al. 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.

LICKER, R. et al. Mind the gap: how do climate and agricultural management explain the 'yield gap'of croplands around the world? Global ecology and biogeography, v. 19, n. 6, p. 769–782, 2010.

LIU, D. L.; BULL, T. A. Simulation of biomass and sugar accumulation in sugarcane using a process-based model. Ecological Modelling, v. 144, n. 2–3, p. 181–211, 15 out. 2001.

MARIN, F. et al. Prospects for increasing sugarcane and bioethanol production on existing crop area in Brazil. Bio Science 66:307–316, 2016.

MARIN, F. R. et al. Eficiência da produção de cana-de-açúcar em duas safras no Estado de São Paulo. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, v. 43, n. 11, p. 1449–1455, nov. 2008.

MARIN, F. R. et al. Evaluation of APSIM-sugar and DSSAT-Canegro for a widely grown Brazilian sugarcane cultivar. International Society of Sugar Cane Technologists: Proceedings of the XXVIIIth Congress, June 24 to June 27, 2013, São Paulo, Brazil. Anais...Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil (STAB) & The …, 2013.

MARIN, F. R. et al. Sugarcane model intercomparison: Structural differences and uncertainties under current and potential future climates. Environmental Modelling & Software, v. 72, p. 372–386, 2015.

MARIN, F. R. et al. On-farm sugarcane yield and yield components as influenced by number of harvests. Field Crops Research, v. 240, p. 134–142, 1 jul. 2019.

MARIN, F. R.; DE CARVALHO, G. L. Spatio-temporal variability of sugarcane yield efficiency in the state of São Paulo, Brazil. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, v. 47, n. 2, p. 149–156, fev. 2012.

MONTEIRO, L. A. Sugarcane yield gap in Brazil: a crop modelling approach. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 15 mar. 2016.

NASSIF, D. S. P. et al. Parametrização e avaliação do modelo DSSAT/Canegro para variedades brasileiras de cana-de-açúcar. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, v. 47, n. 3, p. 311–318, mar. 2012.

NOBRE, C. A. et al. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. Journal of Water Resource and Protection, v. 8, n. 02, p. 252, 2016.

O'LEARY, G. J. A review of three sugarcane simulation models with respect to their prediction of sucrose yield. Field Crops Research, v. 68, n. 2, p. 97–111, 10 out. 2000.

PRADO, H. Solos do Brasil – gênese, morfologia, classificação, levantamento e manejo. Piracicaba, 2005. 281p.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. Monthly Weather Review, v. 100, n. 2, p. 81–92, fev. 1972.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente. Barros & Marques Editoração Eletrônica, 2004.

RITCHIE, J. T. Soil water balance and plant water stress. In: Tsugi, G. Y.; Hoogenboom, G. and Thornton P. K. (Eds.). Understanding Options for Agricultural Production. Kluwer Academic Publishers, 41-54. 1998.

SINGELS, A.; JONES, M.; VAN DER BERG, M. DSSAT v4.5-CANEGRO Sugarcane Plant Module: Scientific Documentation. South African Sugarcane Research Institute, Mount Edgecombe, South Africa. 2008

SINGELS, A.; BEZUIDENHOUT, C. N. A new method of simulating dry matter partitioning in the Canegro sugarcane model. Field Crops Research, v. 78, n. 2–3, p. 151–164, nov. 2002.

SINGELS, A.; DONALDSON, R. A.; SMIT, M. A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: Theory and practice. Field Crops Research. Anais...Elsevier, 14 jun. 2005

UEHARA, G.; TSUJI, G. Y. Overview of IBSNAT BT - Understanding Options for Agricultural Production. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Eds.) Springer Netherlands, 1998. p. 1–7.

VAN ANTWERPEN, R. Modelling root growth and water uptake of sugarcane cultivar NCo 376. 1998.

WALLACH, D. et al. Working with Dynamic Crop Models: Methods, Tools and Examples for Agriculture and Environment. 2018.

3 IDENTIFICANDO E QUANTIFICANDO CAUSAS DE YIELD-GAP USANDO DADOS DE UMA USINA SUCROENERGETICA NA ESCALA DE TALHÃO

RESUMO

O presente estudo destaca a combinação entre uma gama de dados relacionados ao cultivo de cana-de-açúcar utilizados, incluindo fatores de manejo e solo, e sua relação com a variabilidade de produtividade (Ya) da cultura. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo identificar as possíveis causas do *yield-gap* e quantificar a influência desses fatores determinantes da variabilidade da Ya nos talhões comerciais de cana-de-açúcar em uma usina sucroenergética. Para verificação da influência dos fatores na Ya da cultura, foi utilizada uma série de dados relacionados ao manejo cultural e solo ao longo de cinco safras agrícolas, no período de 2013 a 2017. Os efeitos do solo foram verificados por meio do conceito de ambientes de produção de cana-de-açúcar. Houve uma tendência de queda de Ya conforme a diminuição da qualidade do solo. Em relação a influência dos fatores de manejo, foi analisada a variabilidade da Ya da usina em função da data de colheita, data de plantio, dose de vinhaça, torta de filtro, calcário, gesso e dose de maturador, por meio de um histórico desses fatores realizados em cada talhão. Todos os fatores de manejo analisados apresentaram efeito significativo na Ya, com exceção da data de plantio. Foram realizadas comparações entre talhões de alta (HY) e baixa (LY) Ya por meio dos quartis superiores e inferiores da frequência acumulada dos dados. Houve diferença significativa entre as médias de HY e LY, com exceção ao gesso, evidenciando que pequenas diferenças nos fatores de manejo, representam grande variação na Ya, destacando a importância desses fatores na sua variabilidade. Apesar da usina apresentar produtividade 6% acima da média do estado de São Paulo (65 Mg ha^{-1}) entre o período analisado, os resultados evidenciam necessidades de melhoria nos fatores passíveis de controle que impactam no rendimento da cana-de-açúcar.

Palavras-chave: *Saccharum* spp.; Rendimento; Incremento de produtividade; Biocombustível

ABSTRACT

The present study highlights the combining between a range of on-farm data, including management and soil factors related to sugarcane crop cultivation. Thus, the objective of this study was to assess the possible causes of yield-gap and to quantify the driven factors of on-farm sugarcane yield variability. To verify the influence of the factors in the Ya, a series of data related to the cultural and soil management was used for five seasons, across the period from 2013 to 2017. The effects of the soil were verified through the concept of soil management zones assumed for sugarcane crop. There was a trend to decrease in Ya as the soil quality decreased. Related to the management factors, the Ya variability was

analyzed in terms of harvest date, planting date, vinasse rate, filter cake, lime, gypsum, and growth regulator, through a history of these factors performed in each block. The management factors showed significant effect on Ya, except the planting date. Comparisons were made between high (HY) and low low (LY) categories based on pooling fields in the lower and upper quartile of the Ya frequency distribution across years. There was a significant difference between the HY and LY media, with the exception for the gypsum, suggesting that slightly differences in management factors represent a large variation in Ya, highlighting the importance of the management factors in the Ya variability. Despite the sugarcane mill showed Ya 6% above the average of the state of São Paulo (65 Mg ha^{-1}) for the 2013-2017 period, the results show a needing for improvement in the controllable factors that impact the sugarcane yield.

Keywords: *Saccharum* spp., Actual yield, Increased yield, Interference, Biofuel

3.1 INTRODUÇÃO

Não há muitos esforços explícitos para entender como a variabilidade da produtividade de cana-de-açúcar no espaço e no tempo se dá entre os talhões comerciais de cana-de-açúcar. De forma geral, presume-se que essa condição é predominantemente influenciada pelo clima e por sua interação com os demais fatores de produção. A percepção empírica da influência do clima sobre a produtividade da cana-de-açúcar está associada ao seu longo ciclo de crescimento, que varia entre 8 e 24 meses e que, portanto, faz dela uma cultura relativamente mais exposta às condições do tempo.

As variáveis meteorológicas, contudo, não são fatores exclusivos de influência na cultura da cana-de-açúcar e a análise do efeito clima precisa considerar simultaneamente outros fatores de produção. Sabe-se que a produtividade de uma cultura é determinada pela sua genética, variáveis ambientais e de manejo, além disso é influenciada em última instância pelos custos de produção agrícola e pelo valor dos produtos resultantes da operação. Assim, entende-se o porquê a tomada de decisão em relação à produção agrícola, e a compreensão sobre seus fatores determinantes, é tão complexa (Figura 1).

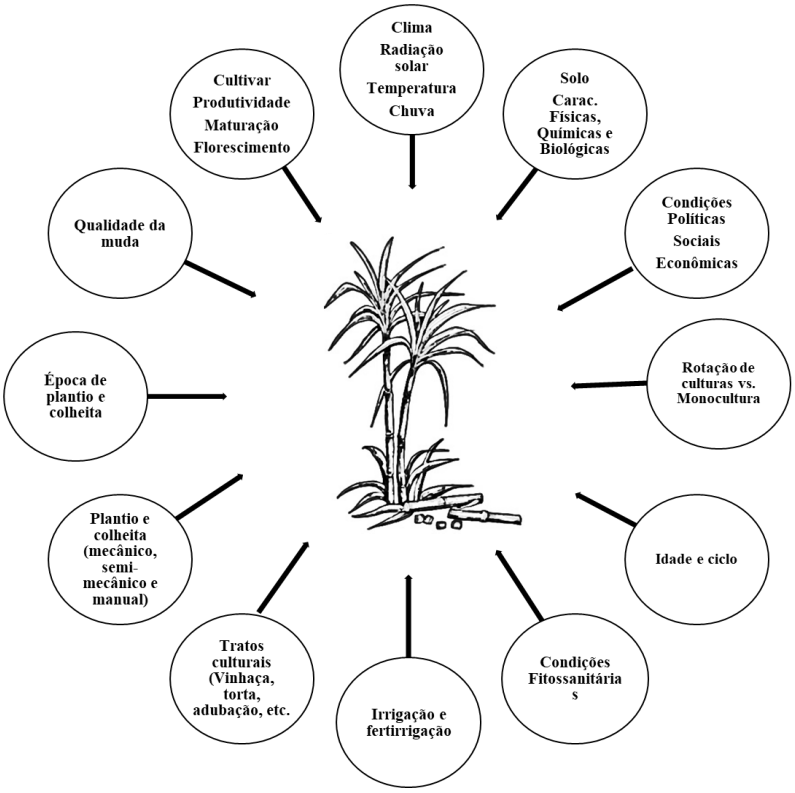

Figura 1. Representação esquemática dos fatores de influência na produtividade de colmos e sacarose da cultura da cana-de-açúcar, adaptado de DIAS 2016

Nos últimos anos houve uma estabilidade ou até mesmo decréscimo da produtividade da cultura da cana-de-açúcar no Brasil (CONAB, 2019). Logo, para um melhor direcionamento de esforços e recursos para melhorar a condução do sistema de produção canavieiro tornando-o mais resiliente e sustentável, surge a necessidade de quantificar os efeitos dos fatores influenciadores e suas respectivas magnitudes na variabilidade da produtividade no espaço e no tempo. A literatura mostra que a determinação dos fatores determinantes da produção agrícola é uma valiosa ferramenta para orientação inteligente de alternativas de gerenciamento para resolução de problemas no setor sucroenergético (BEZUIDENHOUT; SINGELS, 2007; BOCCA; RODRIGUES; ARRAES, 2015; EVERINGHAM; SMYTH; INMAN-BAMBER, 2009; LISSON et al., 2005).

Entretanto, ao se tratar de sistemas complexos, como é o caso da produção agrícola, a caracterização desse sistema exige uma grande descrição, porém gerenciável, interpretável e biologicamente descritível a partir de uma base de informações (WIESE, 1982). Nesse sentido, a partir de uma metodologia de pesquisa e amostra, bem como o uso de inteligência computacional para gerenciamento e integração de dados, os proponentes e restrições da produtividade podem ser indentificados e sua influência pode ser quantificada de acordo como seu impacto no rendimento.

Diversos estudos vêm sendo realizados nos últimos anos em relação a variabilidade da produtividade da cana-de-açúcar, bem como possibilidade de seu incremento (DIAS, 2016; MARIN; DE CARVALHO, 2012; ZU et al., 2018). Contudo, devido à dificuldade de realização de

levantamento de dados de campo em quantidade suficiente para análises estatisticamente robustas, pouco foi reportado sobre a cana-de-açúcar brasileira explicando quais e em qual magnitude os fatores meteorológicos e de manejo explicam a variabilidade da produtividade agrícola.

Neste trabalho, buscou-se identificar e quantificar o efeito relativo dos fatores de produção relacionados ao manejo com base em um banco de dados de uma usina comercial, na escala de talhão, os quais influenciam a produtividade da cana-de-açúcar. Assim o objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade da produtividade da cana-de-açúcar em uma unidade sucroenergética, considerando o solo e fatores de manejo.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

Dados de produtividade real e práticas de manejo na escala espacial de talhões foram coletados de uma usina localizada no estado de São Paulo, Brasil. Os números de anos com dados foram variáveis entre os talhões, variando de 1 a 5 anos, no período de 2013 a 2017. Os dados observados referentes à cada talhão por ano incluíram identificação do talhão, área do talhão, Ya, fatores relacionados ao manejo (data de plantio, data de colheita, dose de maturador, torta de filtro, calcário, gesso e vinhaça) e classificação dos solo em ambientes de produção (Tabela 1). Para cada ano, os dados excedendo a média observada em 1,5 o desvio padrão foram excluídos. Depois desse controle a base de dados apresentou 8656 talhões por ano.

Tabela 1. Lista de variáveis coletadas de talhões de cana-de-açúcar de uma usina no Estado de São Paulo

Variável (acrônimo)	Unidade ou classe
Área do talhão	ha
Produtividade atual (Ya)	Mg ha^{-1}
Data de plantio	Dia juliano
Data de colheita	Dia juliano
Dose de maturador	L ha^{-1}
Torta de filtro	Mg ha^{-1}
Calcário	Mg ha^{-1}
Gesso	Mg ha^{-1}
Dose de vinhaça	m^3 ha^{-1}
Ambiente de produção	Classe A (‘‘melhor’’) a E (‘‘pior’’)

Nesse estudo utilizou-se uma série de dados meteorológicos obtidos de um total de 6 estações meterológicas da usina. A base de dados consistia em dados de radiação solar, temperatura máxima e minima do ar, além de chuva acumulada. A área de abrangência das estações foi determinada pela sua proximidade à cada talhão, conforme explicado no capítulo anterior. Assim cada área de abrangência se referiu ao agrupamento que indicam chuva anual total, cujo valor dá uma indicação da disponibilidade hídrica durante o ciclo da cultura, radiação solar global, temperatura do ar máxima e mínima, respectivamente (Tabela 2, Figura 2).

Tabela 2. Valores médios de radiação solar, temperaturas máxima e mínima, chuva acumulada durante as safras 2013 a 2017.

Safra	Radiação solar (MJ m^{-2} d^{-1}) *	Temperatura máxima (°C) *	Temperatura mínima (°C) *	Chuva (mm) *
2013	18,2	26,40	17,38	1146
2014	19,7	28,15	18,27	807
2015	18,4	27,37	18,60	1422
2016	18,6	27,05	17,61	1449
2017	18,7	27,36	18,05	1444

* Valores médios das seis estações meteorológicas instaladas na área de produção da usina analisada.

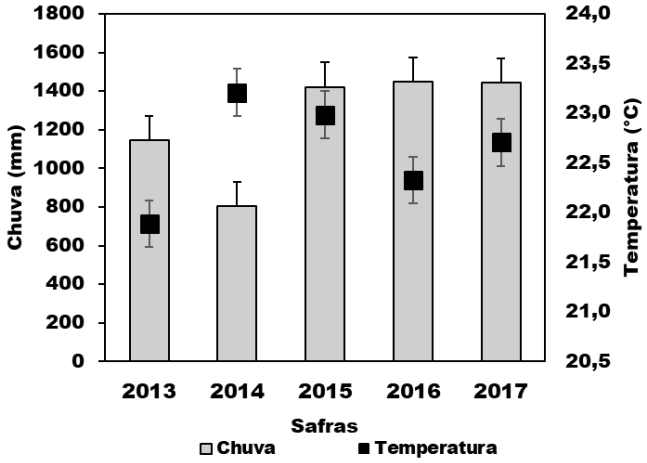

Figura 2. Chuva total anual (mm) e temperatura média anual (°C) entre 2013 e 2017. Os valores são a média das seis estações meterológicas instaladas na área de produção da usina analisada.

No presente estudo foi analisado o comportamento da Ya no período de 2013-2017, bem como os fatores de manejo cultural: data de colheita, data de plantio, dose de vinhaça, torta de filtro, calcário gesso e dose de maturador. Para isso foram estabelecidas as faixas de variação dos dados analisados a partir das distribuições de frequência acumulada para cada ano. Além disso para estimativa da variabilidade dos dados foi calculado o coeficiente de variação interanual (CV%), além isso foi calculado o coeficiente de assimetria das variáveis (A) para verificação da distribuição dos dados em relação à média.

Com a finalidade de estimar as causas de variação da Ya, foram realizadas análises baseadas nos estudos de WIESE (1982). Para isso foram feitas análises de regressão linear em função dos fatores de manejo, obtendo-se a inclinação da reta, o intercepto da função linear e o coeficiente de correlação de Pearson (r) (SNEDECOR; COCHRAN, 1982). Além disso, foi feita a comparação dos fatores de manejo em talhões de maiores (HY) e menores (LY) classes de Ya, a partir da determinação dos quartis superior e inferior de produtividade, ao longo do período analisado. Sendo que a diferença entre HY e LY, foi verificada pelo teste Wilcoxon, uma vez que a distribuição dos dados desviou da normalidade. Enfim, com a finalidade de se analisar a influência dos ambientes de produção na Ya ao longo dos anos, foi realizado o teste de Tukey para confirmação de diferença significativa entre as médias dentre os ambientes para cada ano.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Produtividade atual e práticas agronômicas em talhões de cana-de-açúcar

A Ya dos talhões no período de 2013 a 2017 apresentou CV >26% e A=0,2, evidenciando uma concentração de valores inferiores à média (71,9 Mg ha^{-1}). Os anos de 2014 e 2016, reportaram menor Ya em média comparados com os outros anos, com 71,1 e 65,0 Mg ha^{-1}, respectivamente, entretanto o ano de 2015 apresentou maior Ya, contando com uma média de 77,2 Mg ha^{-1}. O efeito dos anos não foi significativo (p>0,05) em Ya (Figura 3a).

A data de plantio apresentou média de 148 dias e A=0,7, enquanto a data de colheita média foi de 220 dias, com A de -0,01. Observou-se uma maior concentração dos dados nos meses anteriores à data média de plantio, cujo valor corresponde ao 148º dia do ano (28 de maio). Houve diferença significativa dos anos tanto para a data de colheita, quanto para a data de plantio realizada pela usina (p>0,001). (Figura 3b e 3c).

A vinhaça mostrou um A=1,2 e CV>100%, evidenciando alto grau de variabilidade. O ano de 2013 apresentou maior quantidade de vinhaça, em torno de 28,1 m^3 ha^{-1}, já no ano de 2017, observou-se uma redução de 8,5% (Figura 3d). O mesmo ocorreu com a torta de filtro para qual foi observado quantidades mais altas, entretanto em baixa frequência e apresentando A=29, além disso

observa-se o não uso da torta de filtro na safra de 2013, podendo ter influenciado no alto CV% (Figura 3e). O efeito do tempo tanto na vinhaça quanto na torta de filtro foi significativo ($p<0,001$).

Durante o período analisado, observou-se efeito dos anos para as médias de calcário e gesso com $p<0,005$ e $p<0,5$, respectivamente. Em adição, para o calcário e o gesso foi observada maior concentração de dados com valores baixos, apresentando A de 1,8 e 2,7, respectivamente. Além disso ambos os insumos apresentaram alto grau de variabilidade (CV>100) (Figura 1f e 1g).

Para o maturador observou-se doses acima da média de 0,2 L ha^{-1} nas safras de 2015 e 2017. A dose de maturador apresentou A=1,7, indicando uma maior concentração de dados com valores baixos, além disso foi encontrado CV>100%, indicando alto grau de variabilidade dos dados.

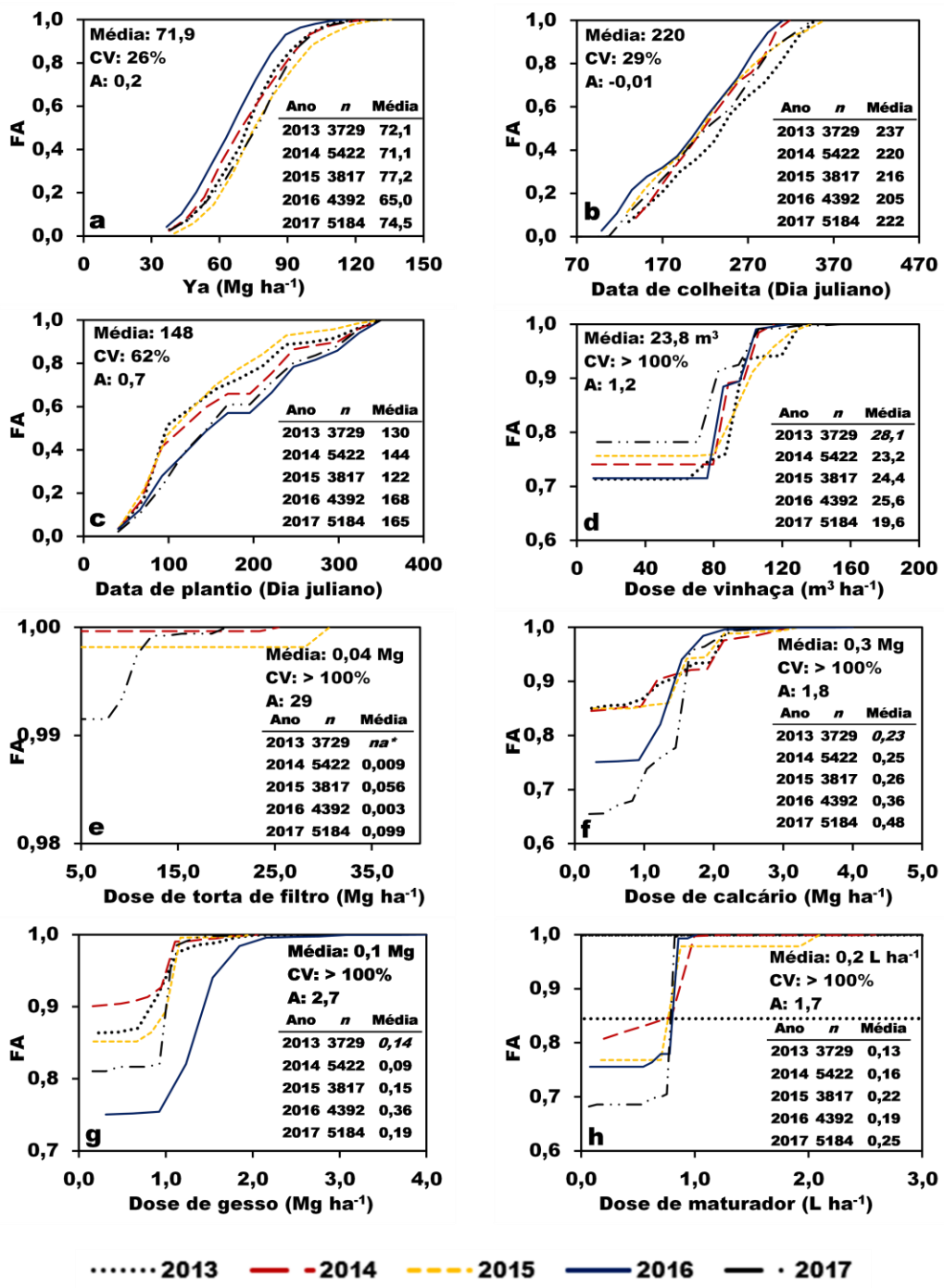

Figura 3. Distribuição de frequência acumulada (FA) da (a) Ya (Mg ha^{-1}), (b) data de colheita (dias julianos), (c) data de plantio (dias julianos), (d) dose de vinhaça (m^3 ha^{-1}), (e) torta de filtro (Mg ha^{-1}), (f) calcário (Mg ha^{-1}), (g) gesso (Mg ha^{-1}) e (h) dose de maturador (L ha^{-1}) obtidos a partir de uma usina de açúcar e álcool no estado de São Paulo durante o período de 2013 a 2017. Os valores médios para cada ano foram representados, além do coeficiente de assimetria (A), coeficiente de variação (CV%) e o número de dados observados (n).

A partir da Ya e em função dos fatores de manejo, observou-se efeito significativo de todos os fatores em Ya, com excessão da data de plantio (p>0,05). Além disso, os interceptos das regressões lineares e a inclinação das retas apresentaram p<0,05 e p<0,001, respectivamente (Tabela 3). Os coeficientes de inclinação foram positivos com exceção da Ya em função da data de colheita.

Tabela 3. Coeficientes da regressão linear da produtividade atual (Mg ha^{-1}) em função de uma série de fatores de manejo. Os efeitos quadráticos não foram significantes.

	Ya (Mg ha^{-1})		
Fator de manejo	Intercepto	Inclinação	Pearson r
Data de colheita (dia juliano)	76,30*	-0,02***	-0,09
Data de plantio (dia juliano)	--	0,00ns	--
Dose de vinhaça (m^3 ha^{-1})	70,11*	0,05***	0,11
Torta de filtro (Mg ha^{-1})	71,08*	1,09***	0,05
Calcário (Mg ha^{-1})	70,68*	1,48***	0,04
Gesso (Mg ha^{-1})	70,84*	2,44***	0,04
Dose de maturador (L ha^{-1})	69,97*	6,62***	0,12

*Significância em $p<0,05$; **Significância em $p<0,001$

A Ya em função dos fatores de manejo foi analisada na forma de quadrantes, os quais representam valores de posição central dos dados. Dessa forma, o quadrante I indica talhões apresentando valores de Ya e fatores de manejo com valores abaixo da média, enquanto os quadrantes II e III representam os talhões com valores superiores à média, entretanto o quadrante II apresenta valores abaixo da média para os fatores de manejo. Por fim, o quadrante IV, representa os talhões com valores inferiores e superiores à média para Ya e fatores de manejo, respectivamente (Figuras 4).

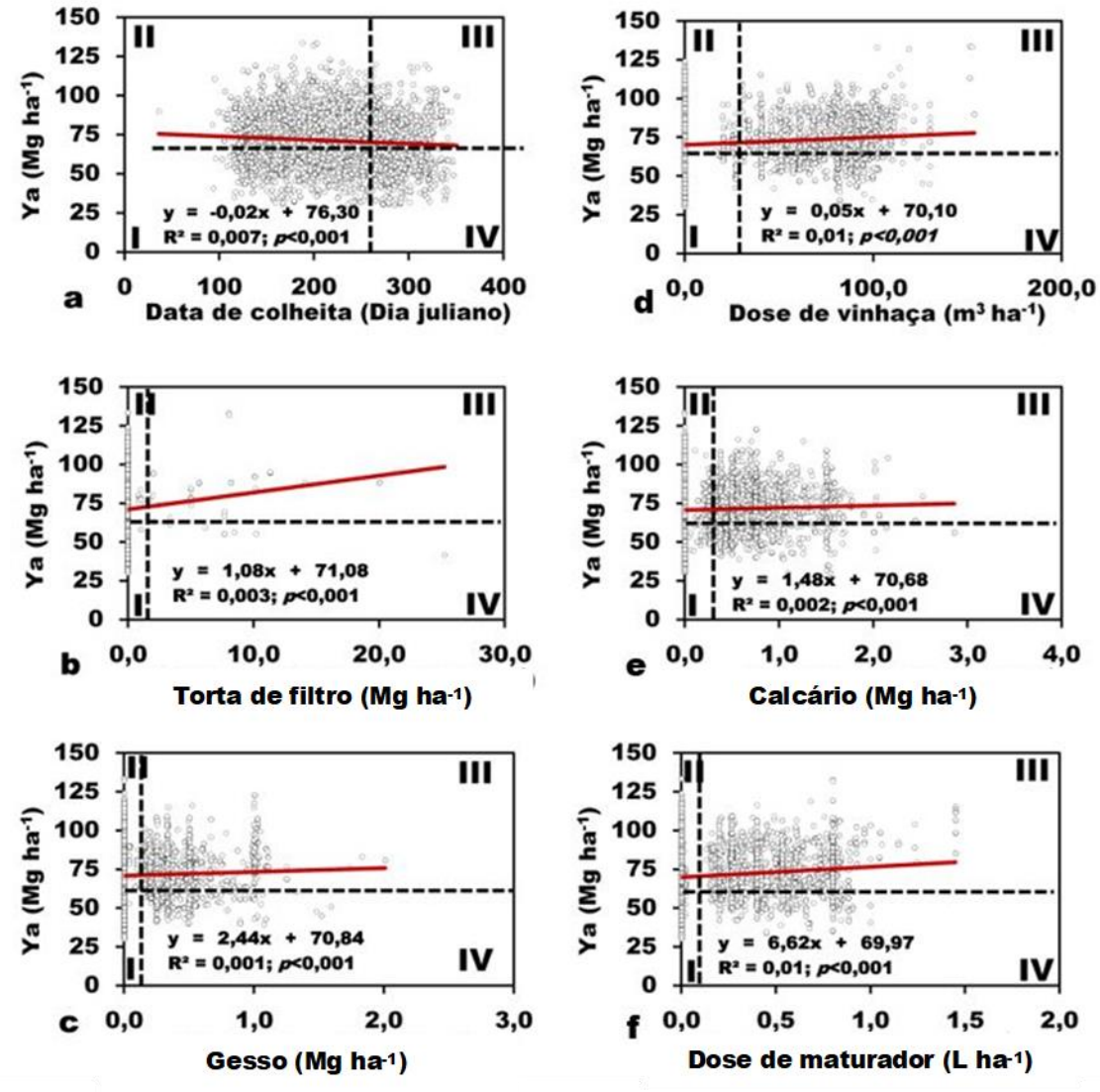

Figura 4. A relação entre a Ya (Mg ha^{-1}) e seus respectivos fatores de manejo. A linha sólida representa o ajuste da regressão linear da reta, enquanto as linhas horizontais e verticais tracejadas representam os valores Ya e de a) Data de colheita (dia juliano), b) Torta de filtro (Mg ha^{-1}), c) Gesso (Mg ha^{-1}), d) Dose de vinhaça (m^3 ha^{-1}), e) Calcário (Mg ha^{-1}) ; g) Dose de maturador (L ha^{-1}).

Todos os fatores de manejo apresentaram diferença estatística entre as médias de HY e LY (p<0,001), com exceção do gesso (p>0,001). Em média os talhões de classe LY foram colhidos no dia 225, enquanto talhões HY foram colhidos no dia 219, com diferença de 6 dias entre LY e HY. A dose de maturador apresentou diferença média de 0.059 L ha^{-1} entre talhões de classe HY e LY, enquanto a torta de filtro mostrou uma diferença de 0,045 Mg ha^{-1}. Para o calcário e dose de vinhaça, foi observado uma diferença de valores de 0,047 e 8,54, respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4. Categorias de menor (LY) e maior produtividade (HY) baseadas no quartil inferior e superior da distribuição de frequência ao longo do período de 2013 a 2017, respectivamente. A diferença (Δ) foi testada pelo teste Wilcoxon (distribuição dos dados desviaram da normalidade).

Fator	LY	HY	Δ
Data de colheita (dia juliano)	225	219	6.00*
Dose de maturador (L ha^{-1})	0.124	0.183	0.059*
Torta de filtro (Mg ha^{-1})	0.005	0.050	0.045*
Calcário (Mg ha^{-1})	0.250	0.297	0.047*
Gesso (Mg ha^{-1})	0.162	0.158	0.003^{ns}
Dose de vinhaça (m^3)	14.258	22.801	8.542*

* Significância em p<0,001; ns: não significativo

Em relação aos ambientes de produção, observou-se um efeito significante na Ya (p<0,001). Houve uma redução de 18% da Ya média de solos de ambiente A para E no período de 2013 a 2017 (Figura 5). Observa-se uma tendência de queda dos valores de Ya conforme os indicadores de ambiente de solo variam de A para E. Os maiores valores de Ya foram encontrados para os ambientes de produção A e B, com produtividade de 83 Mg ha^{-1} e 85 Mg ha^{-1}, respectivamente, enquanto o menor valor de Ya foi de 55 Mg ha^{-1}, encontrado em ambiente de classificação E. Em adição, houve efeito significativo dos anos nos ambientes de produção (p<0,001). Além disso nota-se na safra de 2015 valores superiores de Ya para os ambientes B, C e D, se comparados aos rendimentos dos outros anos do período analisado, sugerindo que o ano de 2015 foi mais favorável à produção de cana-de-açúcar (Figura 5). Todos os ambientes de produção apesentaram diferenças significativas entri si, com excessão dos ambientes C e D. Em adição, notou-se que a Ya para alguns talhões é superior à média geral de Yw.

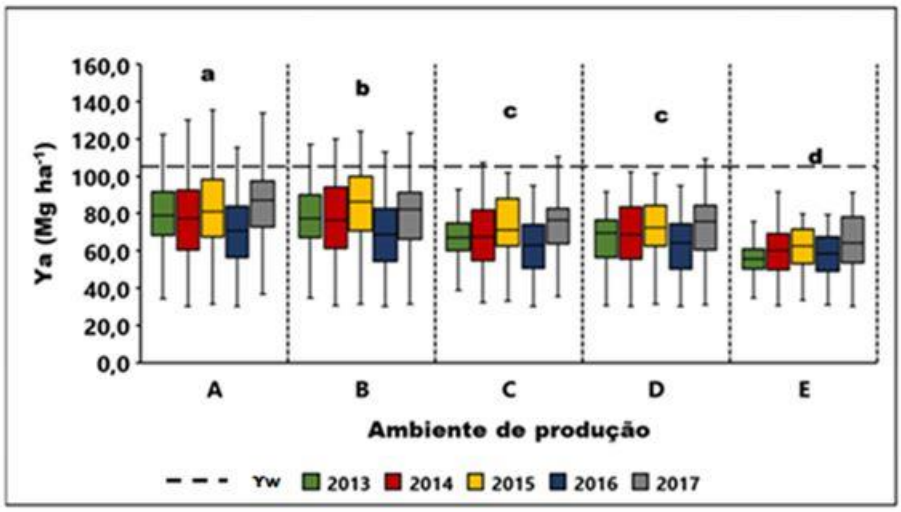

Figura 5. Produtividade atual dos talhões (Ya [Mg ha^{-1}]) em função dos ambientes de produção de cana-de-açúcar no período de 2013 a 2017. A linha tracejada representa a produtividade atingível média (Yw [Mg ha^{-1}]) para o período de 2013 a 2017. As letras acima do boxplot representam os resultados do teste de Tukey.

3.4 DISCUSSÃO

Esse estudo avaliou o impacto de práticas de manejo na produtividade dos talhões de uma usina, bem como a influência do solo. Embora a área de estudo apresente talhões contando com Ya maior que a a média do estado de São Paulo (65,0 Mg ha^{-1}) no período de 2013 a 2017, parte dos talhões apresentam Ya inferior à esse valor, indicando a necessidade de incremento de produtividade, cuja condição não deve ser somente associada aos fatores incontroláveis como o clima e os ambientes de produção.

Os resultados sugeriram que a colheita nos talhões foi após o 220 º dia do ano (8 de agosto), sendo que a época de colheita pode influenciar na produtividade da cana de açúcar, de modo que a cultura diminui o acúmulo de sacarose no colmo em função da época de florescimento, fazendo com que o rendimento em massa da cultura diminua nessa época. Assim, em épocas muito tardias de colheita, a produtividade do canavial pode ser afetada. De modo geral, houve uma tendência de incremento da Ya entre os talhões conforme o aumento dos fatores de manejo. Entretanto, embora existam evidências de uma alta frequência do uso de menores quantidades de calcário e gesso agrícola em grande parte das áreas, observou-se que em alguns talhões o consumo de calcário aumentou ao longo dos anos, evidenciando solos com acides elevada, o que pode ser resultado de uso de vinhaça, cuja influência pode desequilibrar as bases químicas do solo, elevando a acidez.

A partir da diferença entre HY e LY, observou-se que pequenas diferenças em relação aos fatores de manejo, podem influenciar significativamente na Ya, destacando a importância da realização e práticas adequadas de manejo para incremento da Ya e manutenção do canavial. Resultados indicando a significativa relação de técnicas de manejo com a variabilidade da Ya foram sugeridos por MARIN et al., 2019; MARIN et al., 2012 para a cultura da cana-de-açúcar e GRASSINI et al., 2011 em estudos na cultura do milho.

Os resultados referentes aos ambientes de produção, sugeriram uma tendência de declínio da Ya à medida que a classificação diminuiu de A para E, mostrando impacto das características solos na variabilidade da Ya. Evidenciando que, apesar de um manejo ser realizado adequadamente, se o solo não apresentar potencial produtivo, pode ter impacto direto em baixos renimentos da cultura.

3.5 CONCLUSÕES

O uso de dados na escala espacial de talhões para identificar restrições ligadas às técnicas de manejo à produtividade real tem vantagens e desvantagens. A principal desvantagem é que fatores não controláveis dentre dos talhões podem ser confundidos com práticas de manejo na produtividade. Entretanto tal confusão pode ser evitada ou minimizada se os dados utilizados na análise são suficientemente detalhados e com qualidade, além de incluir uma amostra representativa através do ciclo da cultura. Esss requisitos foram atentidos pela base de dados disponibilizada para a realização

desse estudo. A principal vantagem do uso de dados por talhão, é a oportunidade de quantificar o impacto das variáveis de forma intrínseca ao talhão, possibilitando um maior conhecimento de como essas variáveis influenciam na variabilidade da Ya auxiliando na adoção de melhores táticas de manejo. Embora algumas restrições de Ya não podem ser controladas, como variáveis meteorológicas, a Ya pode ser melhorada através de mudanças dos fatores de manejo. Os fatores de manejo analisados nesse estudo, representam uma pequena porção da ampla gama de aspectos relacionados ao manejo que pode exercer influência no rendimento e na longevidade do canavial, tais como compactação de solo, falhas de plantio, espaçamento, adubação da cultura, plantas invasoras, doenças e pragas.

REFERÊNCIAS

BEZUIDENHOUT, C. N.; SINGELS, A. Operational forecasting of South African sugarcane production: Part 1 - System description. Agricultural Systems, v. 92, n. 1–3, p. 23–38, jan. 2007.

BOCCA, F. F.; RODRIGUES, L. H. A.; ARRAES, N. A. M. When do I want to know and why? Different demands on sugarcane yield predictions. Agricultural Systems, v. 135, p. 48–56, 1 maio 2015.

CONAB. Conab - Safra Brasileira de Cana-de-açúcar. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>. Acesso em: 19 nov. 2019.

DIAS, H. B. Intercomparação de modelos de simulação da cana-de-açúcar e seu uso na avaliação da quebra de produtividade e dos impactos da irrigação em diferentes regiões do Brasil. Piracicaba, São Paulo. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2016.

EVERINGHAM, Y. L.; SMYTH, C. W.; INMAN-BAMBER, N. G. Ensemble data mining approaches to forecast regional sugarcane crop production. Agricultural and Forest Meteorology, v. 149, n. 3–4, p. 689–696, 11 mar. 2009.

GRASSINI, P. et al. High-yield irrigated maize in the Western U.S. Corn Belt: I. On-farm yield, yield potential, and impact of agronomic practices. Field Crops Research, v. 120, n. 1, p. 142–150, 14 jan. 2011.

LISSON, S. N. et al. The historical and future contribution of crop physiology and modelling research to sugarcane production systems. Field Crops Research. Anais...Elsevier, 14 jun. 2005

MALAVOLTA, E.; HAAG, H. P. Cultura e adubação da cana-de-açúcar. Instituto Brasileiro de Potassa, 1964.

MARIN, F. R. et al. On-farm sugarcane yield and yield components as influenced by number of harvests. Field Crops Research, v. 240, p. 134–142, 1 jul. 2019.

MARIN, F. R.; DE CARVALHO, G. L. Spatio-temporal variability of sugarcane yield efficiency in the state of São Paulo, Brazil. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, v. 47, n. 2, p. 149–156, fev. 2012.

SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. Statistical methods. 7th. ed. Iowa, 1982

WIESE, M. V. Crop Management by Comprehensive Appraisal of Yield Determining Variables. Annual Review of Phytopathology, v. 20, n. 1, p. 419–432, set. 1982.

ZU, Q. et al. Spatio-temporal distribution of sugarcane potential yields and yield gaps in Southern China. European Journal of Agronomy, v. 92, p. 72–83, 1 jan. 2018.

4 PRODUTIVIDADE DA ÁGUA DA CANA-DE-AÇÚCAR COM BASE EM DADOS DE UMA USINA DO ESTADO DE SÃO PAULO

RESUMO

Comparações apropriadas para a produtividade da água (WP) definida como a produtividade da cultura por unidade de água consumida podem ser úteis para auxiliar na identificação e diagnose de talhões ineficientes de cana-de-açúcar. Tal análise, até então não foi abordada em escala de talhões comerciais de cana-de-açúcar no setor sucroenergético brasileiro, um dos maiores produtores de etanol e segundo maior consumidor mundial do biocombustível. O objetivo desse trabalho foi quantificar a WP de uma usina localizada no estado de São Paulo, Brasil, identificar os talhões com oportunidade de incremento a partir da avaliação da variabilidade espacial da WP e avaliar e quantificar os fatores influenciadores da WP ao longo do período de 2013 a 2017. No presente trabalho comparações para a WP da cana-de-açúcar foram desenvolvidas de relações entre a produtividade atual (Ya) e a evapotranspiração atual (ET_a) e entre a produtividade atingível (Yw) e a evapotranspiração potencial (ET_c) da cultura durante seu ciclo de crescimento. Os dados de Yw, ET_a e ET_c foram simulados pelo modelo de crescimento de plantas DSSAT/CANEGRO (DC). Para a quantificação dos fatores influenciadores foram obtidas taxas de contribuição (*E*) de cada fator a partir do método dos mínimos quadrados parciais (PLS). Resultados mostraram que a WP foi significativamente correlacionada com variáveis meterológicas, fatores de manejo e solo. Para todo período de 2013-2017, o clima contribuiu com 52% da variação de WPa, os fatores de manejo contaram com 40% e o ambiente de produção contribuiu com 8%. Os valores de *E* mudaram em diferentes sub períodos. Conclui-se que apesar da variação de WPa ser principalmente relacionada aos fatores climáticos para todo o período analisado, o E% dos fatores de manejo apresentou maior valor nos anos de 2013 e 2014, sendo a principal causa de variação da WPa para esses subperíodos. O incremento da WPa poderia ser obtido através de melhorias nas práticas de manejo cultural e/ou introdução de um sistema de irrigação

Palavras-chave: *Saccharum* spp., *Benchmarking*, Eficiência hídrica, Simulação, Incremento de produtividade

ABSTRACT

Appropriate benchmarks related to water productivity (WP), defined as yield per unit of water consumed can be used for auxiliary identification and diagnosis of inefficient plots of sugar cane. The analysis has not been approached on-farm scale in the Brazilian sugar-energy sector, one of the largest producers of ethanol and the second largest consumer of biofuel in the world. The objective of this work was to quantify the on-farm WP of a mill located in the state of São Paulo, Brazil, and to assess and quantify the influence caused by main driving factors on the WP over the periods 2013 to 2017. A benchmark for sugarcane WP was developed from relationships between actual yield (Ya) and actual evapotranspiration (ETa), and for attainable yield (Yw) and potential evapotranspiration (ETc) during crop growing cycle. The data of Yw, ETa, and ETc were simulated from the crop model DSSAT/CANEGRO (DC). The quantifying of the influence factors it was obtained contribution rates (*E*) for each factor from the partial least squares method (PLS). The results showed that the WP was significantly correlated to climatic factors, management factors and soil. In general, for the whole period (2013-2017), the climate accounted to 52% of WPa variability, the management factors contributed to 40% and soils with 8%. The values of E changed in different sub-periods. It is concluded that despite the cause in the variation of WPa is caused by mainly the climatic factors for the whole period, the E related to management factors showed higher values for the sub-periods 2013 and 2014, being the main cause of the WPa

variation in these years. The increment in WPa could be obtained from the improvement of the management practices and/or the introduction of irrigation systems in the area.

Keywords: *Saccharum* spp., *Benchmarking*, Water efficiency, Simulation, Yield increasing

4.1 Introdução

A expansão do setor sucroenergético observada no Brasil nas últimas duas décadas, num contexto de substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis, elevou a demanda por terras para o cultivo da cana-de-açúcar. Como forma de compensar a elevação dos preços em decorrência da demanda aumentada, foi a exploração de novas áreas de cultivo em regiões onde os solos tinham menor potencial produtivo e com chuvas mais irregulares e, em alguns casos, insuficientes para atender a demanda da cultura (EFEOĞLU; EKMEKÇI; ÇIÇEK, 2009; ZHENG; YANG, 2005). Em resumo, neste contexto, dois aspectos ganham destaque: a compreensão dos fatores depletores da produtividade associados ao manejo e suas respectivas magnitudes; e a quantificação do efeito do ambiente, representado principalmente pela disponibilidade hídrica para a cultura, uma vez que o estresse hídrico é o principal limitante da produtividade nos canaviais brasileiros sem irrigação.

Neste contexto, é evidente que a irrigação surge como prática agronômica importante para assegurar o suprimento do principal fator depletor da produtividade nessas áreas de expansão. A agricultura é o maior usuário de água contando com 75% da retirada de água do ambiente (HOWELL, 2001; WALLACE, 2000). O setor agrícola consome dois terços dos recursos hídricos disponíveis no mundo (CHRISTOFIDIS, 2008) e estimativas indicam que uso de água na agricultura deve dobrar até 2050 (DE FRAITURE; WICHELNS, 2007). No entanto, a imensa maioria da área canavieira do Brasil é cultivada em condição de sequeiro, onde a chuva é a única fonte hídrica para os canaviais.

A produtividade da água (WP) é um indicador que oferece um benchmarking quantificável para avaliar a produtividade das lavouras em termos à quantidade de água consumida (BOUMAN et al., 2005; PASSIOURA, 2006). A WP pode ser calculada em diferentes escalas de espaço e tempo e em acordo com os objetivos do estudo; pode ser dada pela razão entre a produtividade da cultura e sua transpiração total, ou mesmo a evapotranspiração (ETa), ou ainda em relação ao suprimento total de água, incluindo-se aí a água disponível no solo em adição à chuva e à irrigação. Para culturas de sequeiro e em condições em que os dados ETa observados não estejam disponíveis, pode-se calcular a WP em termos de produtividade por unidade de água, determinada por chuva acumulada e água disponível no solo (GRASSINI et al., 2011a).

Funções de fronteira, obtidas a partir de um amplo banco de dados, têm sido usadas para fins de comparação da produtividade potencial limitada por água (Yw) com WP e sua identificação como fator limitante da produtividade (FRENCH; SCHULTZ, 1984; GRASSINI; HALL; MERCAU, 2009) . Entretanto, a principal limitação dessa metodologia é não considerar a variabilidade ano a ano da radiação solar, da temperatura, do déficit de pressão de vapor, perda de água por evaporação ou drenagem profunda, ou mesmo por não considerarem a água remanescente no solo por ocasião da maturidade fisiológica (ANGUS; VAN HERWAARDEN, 2001). Mesmo assim, as comparações através das funções de fronteira permitem uma estimativa realista da produtividade da cultura e suas

necessidades hídricas, bem como auxiliam na identificação de práticas de manejo para melhorias da WP (GRASSINI et al., 2010).

Apesar da evidente importância, não existem ainda estudos estimando WP e sua influência no rendimento da cana-de-açúcar brasileira, considerando a utilização de dados diários de variáveis meterológicas (temperatura mínima e máxima, radiação solar e chuva), em escala de talhão. Dessa maneira, este estudo tem por objetivo avaliar a WP (Mg de colmo ha^{-1} mm^{-1} de suprimento hídrico) para uma unidade sucroenergética do estado de São Paulo.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

Uma base de dados de 5 anos (2013-2017) foi coletada de uma usina de cana-de-açúcar localizada no estado de São Paulo (Brasil). Para cada ano foram obtidos localização de talhões, tamanho dos talhões, dados de produtividade real (Ya) de cana-de-açúcar cultivada sob condições de sequeiro, dados de solo caracterizados em ambientes de produção, cujo método de classificação é usado nas usinas brasileiras para diferenciar tipos de solo em termos de sua aptidão para o cultivo de cana-de-açúcar, assim um total de 5 ambientes de produção são classificados em um intervalo do melhor (I) ao pior (V). Os ambientes de produção são definidos na sua capacidade de retenção hídrica, taxa de drenagem a atributos químicos do solo (pH, capacidade de troca catiônica, disponibilidade de nutrientes) (PRADO, 2005). A classificação por ambientes de produção é usada consistentemente através de regiões, usinas a produtores para aunílio nas tomadas de decisões referentes às variedades utilizadas, plantio, colheita e outras práticas de manejo utilazadas nos talhões. Além disso, foram obtidos dados número de corte, período de cultivo, data de plantio, data de colheita, dose de maturador e vinhaça utilizado por hectare, quantidade por hectare de torta de filtro, calcário e gesso (Tabela 1).

Tabela 1. Lista de variáveis coletadas de talhões de cana-de-açúcar de uma usina no Estado de São Paulo

Variável (e acrônimo)	Unidade
Localização dos talhões	Latitude, longitude
Tamanho do talhão	ha
Produtividade atual (Ya)	Mg ha^{-1}
Ambiente de produção	Classe A ('melhor') a E ('pior')
Número de corte	1 a 5
Ciclo da cultura	Dias após o plantio (DAP)
Data de plantio	Ano e Dia Juliano
Data de colheita	Ano e Dia Juliano
Dose de maturador	l ha^{-1}
Dose de vinhaça	m^3 ha^{-1}
Torta de filtro	Mg ha^{-1}
Calcário	Mg ha^{-1}
Gesso	Mg ha^{-1}

[a] Número de corte em dado talhão. O número de corte 1 corresponde a primeira cana soca e as subsequentes colheitas (2 ao 5) correspondem às sucessivas soqueiras. Talhões com números de corte >5 não foram incluídos.

Além disso, foi obtido uma série de dados meteorológicos disponibilizados por de 6 estações meterológicas de referência (EMR) no período de 2013-2017 distribuídas nas áreas da usina, cada série consistia em dados de chuva, temperatura máxima e minima do ar, além de radiação solar global (Tabela 2). A área de abrangência das estações foi determinada pela sua proximidade à cada talhão, associando-se um arquivo *shapefile* com a distribuição dos talhões e dos pontos referentes às estações meteorológicas a partir da ferramenta "measure" disponível no ArcGIS 10.5/ArcMap®, totalizando um grupo de 6 áreas de abrangência. Assim, para cada área de abrangência foi determinada a quantidade de chuva acumulada, cujo valor dá uma indicação da disponibilidade hídrica durante o ciclo da cultura; a temperatura máxima e mínima do ar e a radiação solar global representando as condições térmicas após a rebrota da cana-de-açúcar, de forma a possibilitar uma estimativa dessas variáveis para cada talhão.

Tabela 2. Valores médios de radiação solar, temperaturas máxima e mínima do ar, chuva acumulada durante as safras 2013 a 2017. As médias referem-se às seis estações meteorológicas instaladas na usina analisada.

Safra	Radiação solar (MJ m^{-2} d^{-1})	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Chuva (mm)
2013	18,2	26,4	17,4	1146
2014	19,7	28,2	18,3	807
2015	18,4	27,4	18,6	1422
2016	18,6	27,1	17,6	1449
2017	18,7	27,4	18,1	1444

Para o cálculo da WP da cana-de-açúcar para cada talhão, foram considerados os ciclos de cultivo da cultura. Assim a WP doi determinada pelo quociente da produtividade da cultura e o suprimento hídrico evapotranspirado:

$$WPa = \frac{Ya}{ETa}$$

$$WPw = \frac{Yw}{ETc}$$

em que WP é a produtividade da água em Mg ha^{-1} mm^{-1}, entretanto os resultados de WP foram expressos em quilogramas por hectare por mílimetro de água (kg ha^{-1} mm^{-1}), já Ya e Yw são as produtividades atual e potencial limitada por água em Mg ha^{-1}, respectivamente. ET_a, é a evapotranspiração atual medida em milímetros (mm), a qual se refere ao consuma de água pela cultura e também pela evaporação de água pelo solo. Enquanto a ET_c é a evapotranspiração em condições padrão, ou seja, a qual ocorre com a cultura crescendo sem limitações (ALLEN et al., 2008).

Os dados de Yw foram simulados a partir do modelo de crescimento de plantas DSSAT/CANEGRO (DC) para o qual foi utilizada os dados da cultivar RB867515, anteriormente calibrado por MARIN et al., 2015; NASSIF et al., 2012, cujos dados foram coletados de sete experimentos localizados pelo Brasil e conduzidos por muitos anos através de um ampla gama de

tipos de solos e diferentes climas representativos das principais regiões produtoras do Brasil. Dentre os sete experimentos conduzidos, o cultivo de cana-de-açúcar foi realizado sem limitações de crescimento devido à deficiências nutricionais e estresse causado por pestes e doenças. Sendo que os rendimentos obtidos por esses experimentos foram muito próximos de Yw para cada local, bem como representativos através dos anos nas principais regiões produtoreas de cana-de-açúcar do Brasil. Além disso, após a calibração o modelo DSSAT/CANEGRO (DC) atingiu uma boa reprodução do desenvolvimento da cana de açúcar e os dados de produtividade observados na colheita, com alcance de 77 a 152 Mg ha^{-1}) apresentaram concordância com os valores projetados pelo DC (RMSE = 16,5 Mg ha^{-1}), sendo este nível de erro médio quadrado observado por outros autores em avaliação de modelos de crescimento de cana-de-açúcar em estudos anteriores (KEATING et al., 1999; O'LEARY, 2000; SINGELS; BEZUIDENHOUT, 2002). Os dados de solo e variáveis meteorológicas referentes aos talhões da usina, foram utilizados como *inputs* do modelo, para uma representação fiel da área de estudo. Quanto à configuração de manejo da cultura, foram simulados ciclos ara a cana planta e soca (cana de rebrota) de acordo com as épocas de cada respectivo talhão disponíveis na base de dados fornecida pela usina, entretanto somente foram utilizados os dados de cana soca devido à não disponibilidade informações de cana planta na base de dados da usina. Os dados de adubação, padrões de plantio, quantidade de cortes, foram devidamente cadastrados de modo a representar canaviais comerciais da usina crescendo sem limitação. O modelo DC simula a evaporação potencial do solo e a transpiração potencial da planta usando uma adaptação do método Priestley and Taylor (1972) conforme descrito em Marin e Jones (2014). A evaporação atual é simulada a partir de uma redução da evapotranspiração potencial através de um fator de redução o qual é calculado usando o conteúdo de água relativa definida pela relação entere o conteúdo volumétrico atual e o conteúdo de água na saturação, a transpiração atual é simulada a partir da absorção radicular de água, a qual considera a umidade do solo e a densidade do comprimento radicular, sendo a evaporação atual simulada usando uma adaptação conforme descrita em Ritchie (1998)

Análises de regressão foram utilizadas para verificação da Ya e Yw da cultura em função da ET_a, além disso foi determinado o coeficiente de variação (CV%) relacionado. Também, foram realizadas análises de regressão linear da WP em função de cada respectivo fator de manejo especificados, obtendo-se a inclinação da reta, o intercepto da função linear e o coeficiente de correlação de Pearson (r) (SNEDECOR; COCHRAN, 1982). Em adição foi feita uma análise gráfica da relação entre o rendimento dos talhões e a ET_a em função do ambiente de produção. Além disso, com a finalidade de se analisar a influência dos ambientes de produção na WP, foi realizado o teste de Tukey para confirmação de diferença significativa entre as médias dentre os ambientes.

Para a representação espaço-temporal de WPa e WPw, primeiramente foram combinados os dados médios anteriormente determinados com o arquivo em formato shapefile da área da usina referente a todos talhões período de 2013 a 2017 pelo ArcGIS 10.5/ArcMap® no DATUM WGS84. A partir disso foi realizado o mapeamento de cada talhão com seu respectivo valor de WP bem como a

quantificação de seu respectivo CV% relacionado, permitindo uma análise detalhada dos talhões através do espaço e tempo. Além disso foi quantificado o coeficiente de assimetria (A) entre o período analisado, para verificação da tendência de concentração dos dados em torno da normalidade.

Para investigação das fontes de variabilidade de WP nos talhões através dos anos foram calculadas taxas de contribuição dos fatores influenciadores da WP a partir do método dos mínimos quadrados parciais ou PLS (*Partial Least Squares method*), cuja análise é baseada em parâmetros (β) estimados pelo método PLS, além disso esse método foi utilizado com o objetivo de evitar a multicolinearidade dos fatores influenciadores da WP. Assim, as taxas de contribuição dos fatores influenciadores (*E*%) foram desenvolvidas para o período de 2013-2017 e para quatro sub períodos, ou seja, para os anos 2013, 2014, 2015, 2016 e 2017, com a finalidade de analisar a relação geral entre WP e seus fatores influenciadores. As proporções de E somadas para os períodos resultam em 1.

4.3 Resultados

A ET_a teve um valor médio de 860 mm, oscilando no intervalo de 475 a 1229 mm dentre os talhões para o período de 2013-2017 e os coeficientes da regressão linear representaram um aumento de 0,02 Mg ha^{-1} e 0,03 Mg ha^{-1}, em relação à Ya e Yw, respectivamente (Figura 1a). A partir dos resultados da análise de regressão da ET_a em função do número de cortes, observou-se uma tendência de queda na ET_a em torno de 4,28 mm conforme o avanço do número de corte. Além disso, foi observado efeito estatisticamente significativo dos sucessivos números de corte na ET_a (p<0.05) (Fig. 1b).

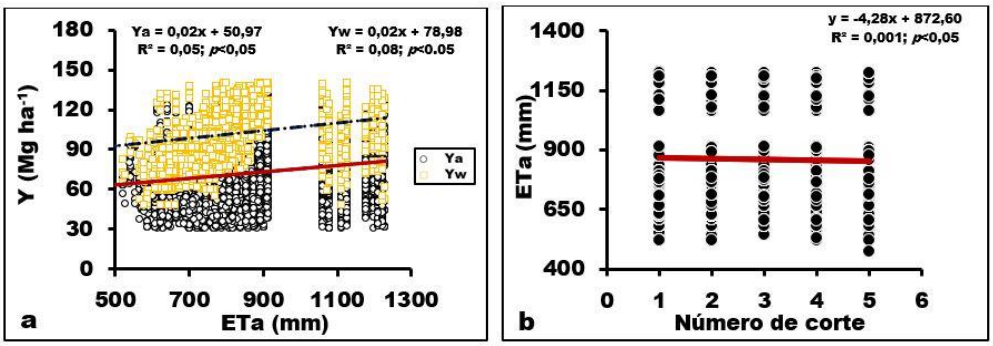

Figura 1. a. Relação entre o rendimento dos talhões (Mg ha^{-1}) e a evapotranspiração (ET_a[mm]) durante o cico da cana-de-açúcar. Ya é a produtividade atual e Yw refere-se à produtividade atingível. As linhas tracejada e sólida refere-se à regressão linear da Yw e Ya, respectivamente. b. A ET_a simulada em função dos sucessivos estágios de corte.

As análises de regressão da WPa em função dos fatores de manejo apresentaram efeito estatisticamente significativo (p<0,05) relacionados ao coeficiente angular para data de plantio, data de colheita, calcário, vinhaça e período de cultivo, exceto para torta de filtro, gesso, maturador e número de cortes. Observou-se tendência negativa para a inclinação da função linear considerando-se apenas

aquelas que demonstraram efeito estatisticamente significativo. O coeficiente angular foi de -0.03 para data de plantio, -0,01 data de colheita, -1,31 para o calcário, -0,02 e -0,01 para vinhaça e período de cultivo, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3. Coeficientes da regressão linear (intercepto a inclinação) e correlação (*r*) entre a produtividade da água atual (WPa, kg ha^{-1} mm^{-1}) e uma série de fatores de manejo. Efeitos quadráticos não foram significantes.

	WPa (kg ha^{-1} mm^{-1})		
Fator de manejo	Intercepto (kg ha^{-1} mm^{-1})	Inclinação	Pearson (*r*)
Data de plantio	90,98*	-0,03*	-0,134
Data de colheita	82,47*	0,01*	-0,040
Torta de filtro (Mg ha^{-1})	85,80*	-0,15ns	-0,005
Calcário (Mg ha^{-1})	86,22*	-1,30*	-0,036
Gesso (Mg $ha^{-1)}$	85,78*	0,09 ns	0,001
Dose de vinhaça (m^3 ha^{-1})	86,22*	-0,02*	-0,031
Dose de maturador (l ha^{-1})	85,73*	-0,31 ns	0,005
Número de corte (1 a 5)	85,77*	0,01 ns	0,0005
Período de cultivo (DAP)	87,92*	-0,01*	-0,020

*Significância em $p<0.05$, ns: não significativo (todos os valores com ns foram testados em um nível de significância em $\alpha < 0.001$).

Os talhões em ambiente de produção A mostram maior Yw, Ya e ET_a, o qual foi estatisticamente igual ao ambiente B (Figura 2). Em média, os talhões de ambiente A tiveram em torno de 890 mm, com 78,8 Mg ha^{-1} e 116,7 Mg ha^{-1} para ET_a, Ya e Yw, respectivamente (Figura 2). Os talhões em ambiente de produção B apresentaram 885 mm para ET_a, contando com 111,0 Mg ha^{-1} para Yw e 76,8 Mg ha^{-1} para Ya. O ambiente C foi estatisticamente igual ao ambiente D, entretanto ambos diferiram estatisticamente do ambiente A e B. A ET_a foi 847 mm para o ambiente C, com 68,3 e 96,4 Mg ha^{-1} para Ya e Yw, nessa ordem. Enquanto o ambiente de produção D apresentou 851 mm, 96,6 Mg ha^{-1}. 68,7 Mg ha^{-1} para ET_a, Yw e Ya, respectivamente. Os talhões de ambiente E foram estatisticamente diferentes dos ambientes A, B, C, e D. Em média, o ambiente E mostrou menor Yw, Ya e ET_a, com 81,7 Mg ha^{-1} 60.6 Mg ha^{-1} e 798 mm para Yw, Ya e ET_a, nessa ordem. Além disso observou-se o efeito de redução de ET_a de acordo com a gradual redução de classe dos ambientes de produção, bem como uma tendência de redução de Ya e Yw.

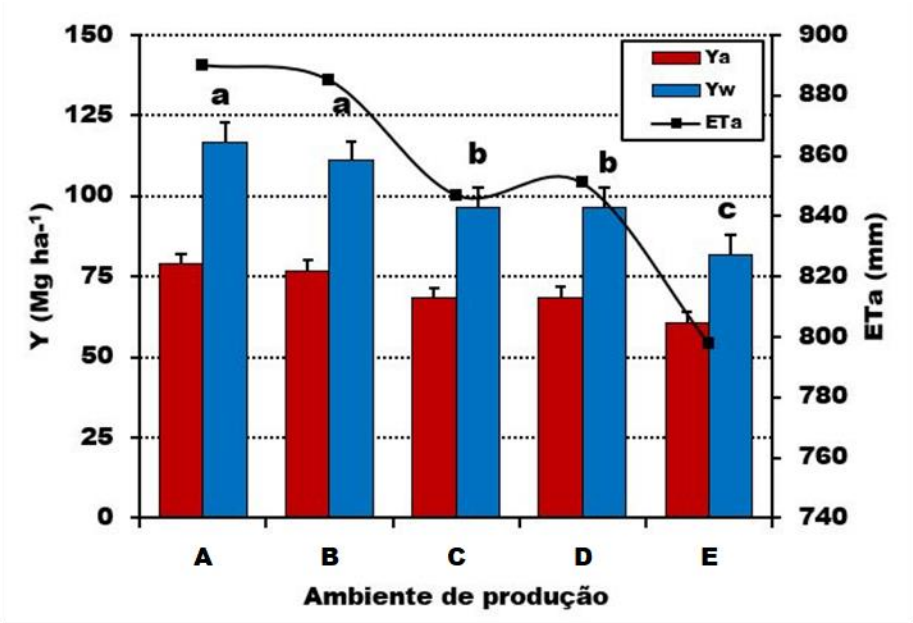

Figura 2. Produtividade e evapotranspiração (ETa [mm]) durante o ciclo da cultura em função dos ambientes de produção de cana-de-açúcar, classificados do melhor (A) ao pior (E). As letras localizadas acima das barras indicam diferenças significativamente estatística entre as médias ($p<0,05$).

A distribuição de WPa em função dos fatores de manejo, foi analisada na forma de quadrantes, os quais representam valores de posição central dos dados. Dessa forma, o quadrante I indica talhões apresentando valores de WPa e seu fatores de manejo correspondentes com valores abaixo da média da usina. Em relação aos quadrantes II e III, estes representam os valores para WPa superiores à média observada, entretanto o quadrante II apresenta talhões com os fatores de manejo inferiores à média, se comparado aos quadrantes número III e IV. Por fim, o talhão de número IV, representa os talhões de WPa e fatores de manejo abaixo da média. Para a WPa, observou-se valor médio em torno de 85,8 kg ha^{-1} mm^{-1}, 148 dia para a data de plantio, no intervalo de 15 a 350 dias (Figura 3a), 219 para a data de colheita, oscilando entre 36 a 359 dias (Figura 3b), quanto ao calcário, o valor médio foi de 1,5 Mg ha^{-1}, no intervalo de 0,4 a 4,0 Mg ha^{-1} (Figura 3c). Ao se tratar do ciclo da cultura, observou-se um valor médio de 362 DAP, no intervalo de 92 DAP e 547 DAP (Figuras 3d), para o volume de vinhaça foi encontrado média de 93,0 m^3 ha^{-1}, com amplitude de 59,8 a 153,6 m^3 ha^{-1} (Figura 3e).

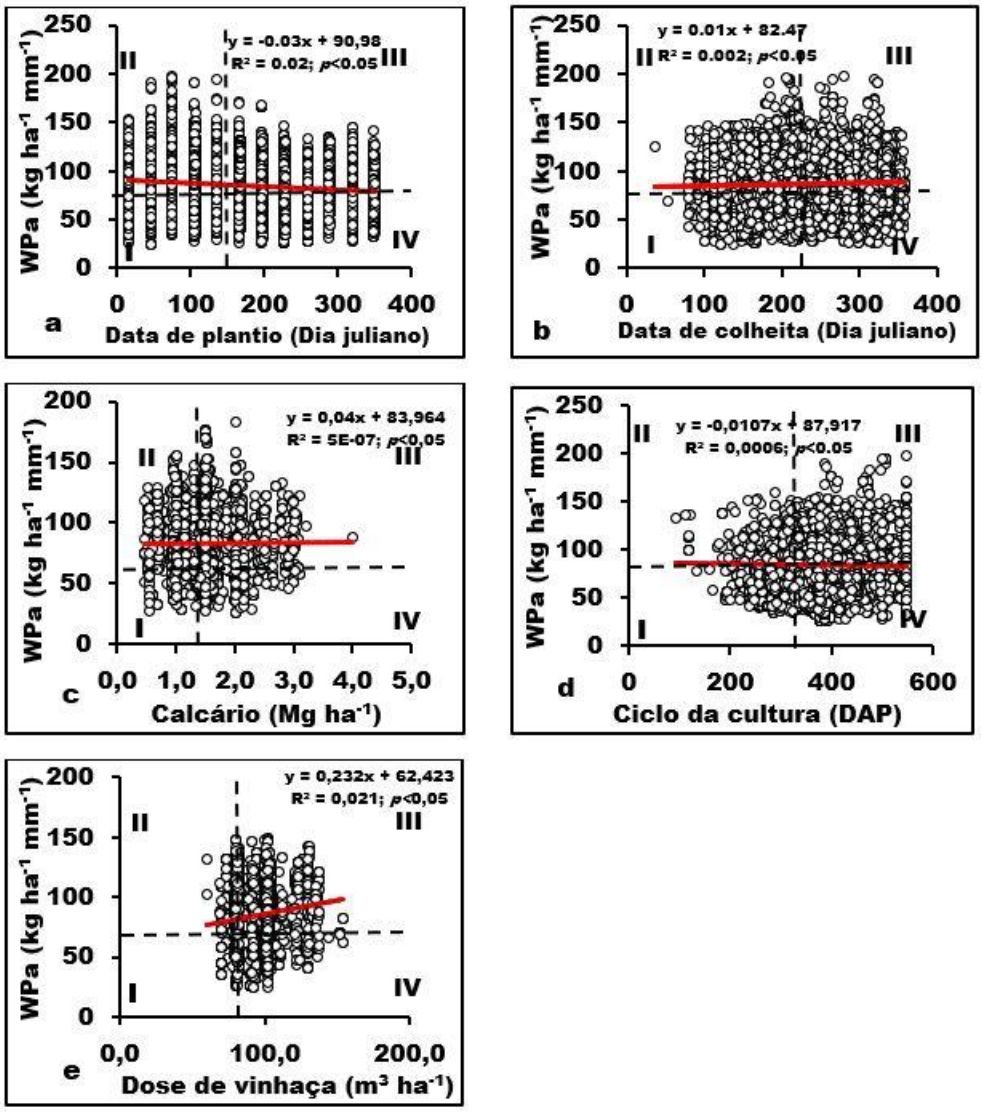

Figura 3. Relação entre a produtividade atual da água (WPa [kg ha^{-1} mm^{-1}]) e os fatores de manejo. As linhas sólidas representam a função da regressão linear a as linhas tracejadas verticais representam os valores médios de WPa, as linhas tracejadas horizontais representam as medias de a) data de plantio (Dia juliano); b) data de colheita (Dia juliano); c) Calcário (Mg ha^{-1}); d) Ciclo da cultura (DAP) e e) Dose de vinhaça (m^3 ha^{-1}).

A partir da espacialização dos dados de WPa intrínsecos à cada talhão, observou-se uma magnitude no intervalo de 32,2 a 185,9 kg ha^{-1} mm^{-1}, indicando uma alta variabilidade dos dados através do espaço e tempo (CV=21%) (Figura 4). A WPa dos talhões no período de 2013 a 2017 foi normalmente distribuída, apresentando A=-0,04, com os valores distribuídos de modo aproximadamente simétricos ao longo da média (84,7 kg ha^{-1} mm^{-1}). Apesar da ampla gama de valores, os dados que ocorrem com maior frequência relativa (FR=20%) estão compreendidos entre o intervalo 82,4 e 93,9 kg ha^{-1} mm^{-1}. A WPa máxima atingida foi em torno de 185,9 kg ha^{-1} mm^{-1}, com FR em torno de 0,02%, enquanto o valor mínimo observado atingido foi de 24,0 kg ha^{-1} mm^{-1} com ocorrência em de menos de 0,6% dos casos. Talhões cuja localização é na parte central e nordeste da usina apresentam de forma geral, WPa inferior, com magnitude de 30,2 a 81,5 kg ha^{-1} mm^{-1}, se comparados à talhões localizados em outras áreas da usina. A região com maior concentração de

talhões de superior WPa, no intervalo em torno de 93,7 e 146,1 kg ha^{-1} mm^{-1} se localizam na parte noroeste da usina, cuja região é classificada apresenta, em sua maioria, por ambientes a A a C, sendo que o mesmo se observou para WPw (Figura 5). Entretanto, para WPw houve uma variabilidade regular dos dados, com CV em torno de 15%. A média de WPw estimada na usina foi de 121,4 kg ha^{-1} mm^{-1}, contando com uma magnitude de valores em torno de 32,2 a 146,1 kg ha^{-1} mm^{-1}. Observou-se A= -0,36, sugerindo uma distribuição de valores simétricos ao longo da média. Em adição, o intervalo de WPw de 117,9 a 128,0 kg ha^{-1} mm^{-1} foi encontrado com maior freqûencia entre os talhões, apresentando FR em torno de 24%, já a WPw na magnitude de 181,9 a 192,73 kg ha^{-1} mm^{-1} foi encontrada em menos de 0,02% dos talhões.

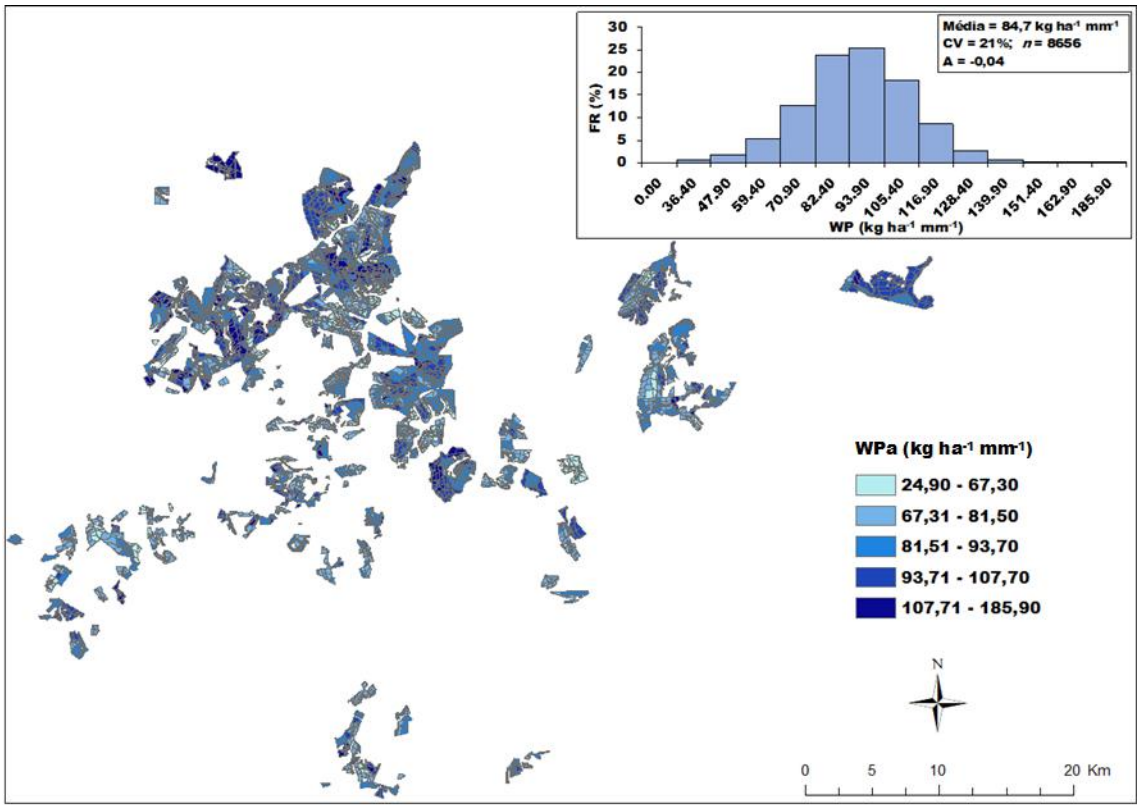

Figura 4. Mapa de produtividade média da água (WPa), proveniente da relação entre Ya e ET_a (Ya; [kg ha^{-1}] por milímetros [mm]) e distribuição de frequência de valores de WPa nos talhões comerciais de cana-de-açúcar no período de 2013 a 2017.

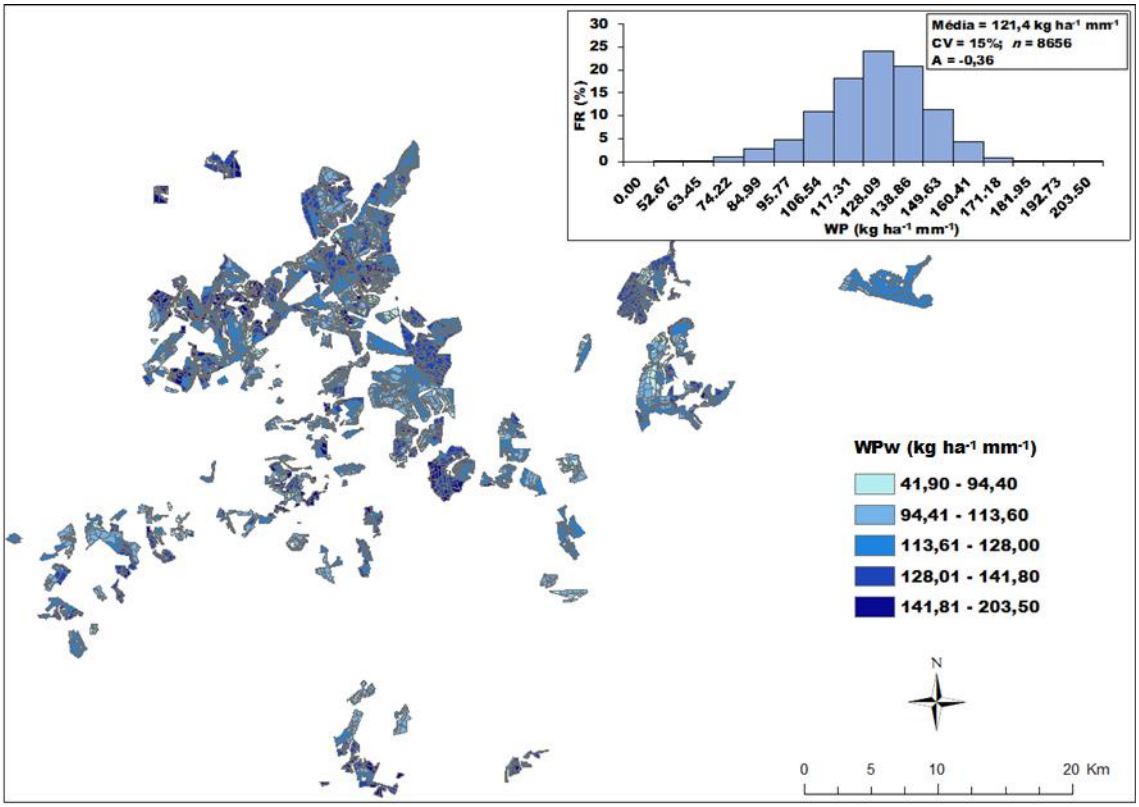

Figura 5. Mapa de produtividade média da água (WPw), proveniente da relação entre Yw e ET_c (Yw; [kg ha^{-1}] por milímetros [mm]) e distribuição de frequência de valores de WP w nos talhões comerciais de cana-de-açúcar no período de 2013 a 2017.

As proporções de *E*% dos fatores influenciadores da WPa estão apresentadas na Tabela 4. Para o período de 2013-2017, os valores de *E*% dos fatores de manejo incluindo a data de plantio, data de colheita, período de cultivo, quantidade de calcário e volume de vinhaça, contaram com 1,6%, 8,9%, 23,5%, 3,9% e 1,7%, respectivamente. Os fatores climáticos como chuva e radiação solar, contribuíram com 30,2% e 12,8% na variabilidade de WPa, além disso observou-se uma leve contribuição da temperatura máxima e temperatura mínima do ar, contando com 1,4% e 7,4%, respectivamente. Além disso, os ambientes de produção contaram com 8,6% na variação de WPa.

Os valores de *E*% dos fatores influenciadores da WPa oscilaram nos diferentes sub períodos (Figura 6). Chuva apresentou o menor valor de *E*% em torno de 15% no ano de 2013; aumentando para 29% em 2014 e diminuindo para 17% em 2015, apresentando valores em torno de 13% e 27% nos anos de 2016 e 2017, respectivamente. A temperatura máxima apresentou *E*% em torno de 12% e 5% para os anos de 2013 e 2014 nessa ordem, aumentando para 11% em 2015, tendendo à uma queda de 10% e 8%, respectivamente durante os anos de 2016 e 2017. Enquanto o *E*% para temperatura mínima aumentou de 2013 a 2015, apresentando valores em torno de 3%, 5% e 14% em cada respectivo ano, diminuindo em 2016 e 2017, com *E* de 4% e 6%, respectivamente. Quanto ao ambiente de produção, observou-se aumento de 13% no ano de 2013 para 15% no ano de 2014, entretanto houve uma redução para 12% e 3% nos anos de 2015 e 2016, respectivamente, já para o ano

de 2017 houve um aumento para 7%. Ao se tratar dos fatores de manejo, a data de plantio contou com 2% e 9% nos anos de 2013 e 2014, nessa ordem, diminuindo para 2% no ano de 2015 e 1% em 2016, havendo uma tendência de aumento em torno de 18% em 2017. Enquanto a data de colheita apresentou queda de 9% de 2013 até 2014, com valores de 13% e 4%, respectivamente, contudo observou-se um aumento em torno de 13% de 2014 até 2015, cujo valor foi de 17% e uma tendência de queda com 13% em 2016 e 6% no ano de 2017. Em relação ao cilco da cultura, o valor de *E*% foi de 14% em 2013, com aumento em torno de 6% em 2014 e queda de 3% em 2015, o qual teve um valor de 17%, já para os anos de 2016 e 2017 notou-se valores de *E*% contando com 19% e 6%, respectivamente. O calcário demonstrou *E*% de 7% e 9% para 2013 e 2014, nessa ordem, 4% em 2015 e apresentou uma tendência de aumento com 6% para o ano de 2016 e 9% em 2017. No caso da vinhaça, notou-se uma pequena redução do valor de *E*% a partir do ano de 2013 a 2017, com 7% em 2013, 2% no período de 2014 a 2016 e queda para 1% em 2017.

Tabela 4. Resultados do método dos mínimos quadrados parciais e a taxas de contribuição (*E*%) de cada fator influenciador da WPa. β é o parâmetro estimado pelo modelo.

Fator	2013-2017	
	β	*E* (%)
Chuva	0.828	30.2
Temperatura máxima do ar	0.038	1.4
Temperatura minima do ar	0.204	7.4
Radiação solar	0.350	12.8
Ambiente de produção	-0.235	8.6
Data de plantio	0.045	1.6
Data de colheita	0.244	8.9
Periodo de cultivo	0.645	23.5
Calcário	0.107	3.9
Dose de vinhaça	-0.047	1.7

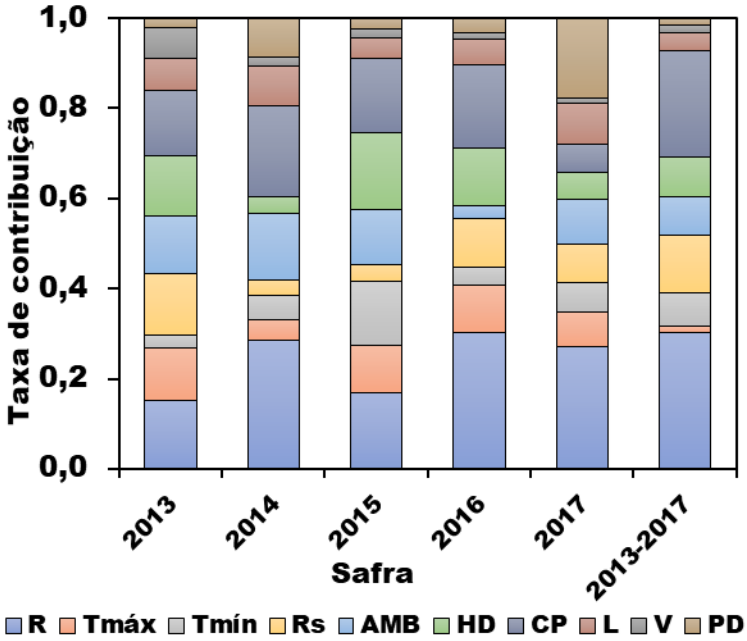

Figura 6. Proporções das taxas de contribuição de cada fator em diferentes períodos, R: chuva, Tmáx: temperatura máxima do ar durante o período de crescimento, Tmín: temperatura mínima do ar durante o período de crescimento, Rs: radiação solar, AMB: ambiente de produção, PD: data de plantio, HD: data de colheita, CP: ciclo da cultura, L: calcário, V: dose de vinhaça.

4.4 DISCUSSÃO

Na linha de regressão média da WP, avaliando-se o rendimento para um talhão específico em relação ao Yw com a mesma ET_a que para Ya conseguiu-se estimar um Yg da água, sendo o seu tamanho em torno de 37,2 kg ha^{-1} mm. Assim, quanto mais ampla a magnitude do déficit de produtividade, menor é a WPa. Da mesma fora, para o mesmo nível de produtividade, a diferença na ETa para um dado talhão pode indicar um potencial excesso de água, apesar de não ser o caso da usina nesse estudo. Na usina, a WPa dentre os talhões raramente excedeu (1%) a WPw estimada. Além disso, o presente estudo demonstra que os dados em nível de talhão podem ser usados para identificar o impacto dos fatores de manejo na WPa, desde que esses fatores têm sido atribuídos ao declínio de produtividade (CHERUBIM, et al., 2016). Por exemplo, a tendência de queda na WPa conforme se sucedem os números de corte da cultura, evidenciando a importante função das práticas de manejo na explicação do declínio de soqueira, além disso deve haver uma alta pressão de pragas conforme o avanço no número de cortes (DINARDO-MIRANDA and FRACASSO, 2013). Assim, presume-se que o declínio de soqueira é consequência dos fatores de manejo e não um atributo fisiológico inerente à cultura (MARIN et al., 2019). O ambiente de produção também assume uma importante função no declínio da WPa, devido ao cultivo de cana-de-açúcar em solos de baixa qualidade e regiões declivosas com baixa retenção hídrica, aliados à toxicidade e/ou declínio na disponibilidade de nutrients (OTTO et al., 2011).

A correlação negativa para ciclo da cultura e data de plantio, bem como a correlação positiva de data de colheita com WPa são devido a disponibilidade de água durante os meses do ano. Sendo que para a cana-de-açúcar cultivada sob condições de sequeiro, a chuva entre 1100 e 1500 mm com boa distribuição é considerada adequada (TEIXEIRA et al., 2016). Durante a fase ativa de crescimento da cultura, como a fase de plantio, o deficit hídrico pode reduzir a área foliar, afetar o perfilhamento e a formação do número de folhas por colmo (INMAN-BAMBER, et al., 2005). Entretanto durante a maturação (TEJERA et al., 2007), o excess hídrico pode levar à redução na qualidade tecnológica da cultua, nesse caso o declínio de chuva é favorável à WPa.

É evidente que a WPa é variável de acordo com a data de plantio e data de colheita, durante os períodos de escassez de água a WPa tende a diminuir e para períodos com alta disponibilidade hídrica a WPa tende a aumentar, sendo variável durante o ciclo da cultura. Os fatores como vinhaça e o calcário apresentaram efeito positivo na WPA. A vinhaça é fonte de nitrato, potássio e matéria orgânica (SANTOS, 2010) e seu uso modifica as características químicas do solo e aumenta a disponibilidade de alguns elementos para a cultura. Em relação ao calcário atua na correção da acidez do solo, prevenindo a toxicidade da planta por alumínio, resultando em melhor um melhor desenvolvimento da cultura, portanto maior eficiência no uso da água.

Cabral, et al., 2013, através do uso de eddy covariance encontrou resultados similares para a WPa da cana-de-açúcar para duas safras no estado de São Paulo, com valor médio de 42 kg ha^{-1} mm^{-1}. Eksteen et al., 2014 na África do Sul encontrou valores no intervalo de 58 a 78 kg ha^{-1} mm^{-1} para diferentes variedades de cana-de-açúcar e lâminas de irrigação. Teixeira et al., 2016, usando imagens do satélite MODIS com dados meteorológicos em grids para as análises, encontrou valores de WPa na amplitude de 28 to 60 kg ha^{-1} mm^{-1}. Além disso, de acordo com Chooyok et al., 2013, a média global de WPa é em torno de 48 kg ha^{-1} mm^{-1}. Assim os resultados do presente estudo são consistentes com aqueles obtidos por estudos realizados anteriormente. Embora a WPa média dos talhões foi em torno de duas vezez maior que a média global, observou-se um deficit de 36.67 kg ha^{-1} mm^{-1} para se atingir a WPw dos talhões, evidenciando a necessidade de melhorias nas práticas de manejo, uma vez que os fatores climáticos não são controláveis. Ainda, Chooyok et al., 2013 obteve WPa de 58 e 65 kg ha^{-1} mm^{-1} para duas regiões distintas na Tailândia, concluindo que estes valores eram dependentes dos fatores climáticos, do solo e data de plantio. Nesse presente estudo, embora a data de plantio tenha contribuído para a variação na WPa, outros fatores de manejo tiveram maior contribuição.

No geral, a contribuição dos fatores climáticos é maior que aquelas apresentadas pelos fatores de manejo, sendo esta maior que a taxa de contribuição do ambiente de produção. O clima contou com 52% da variação de WPa para o período de 2013-2017, os fatores de manejo contaram com 40% e o ambiente de produção contribuiu com 8%. Apesar da variação de WPa ser principalmente relacionada aos fatores climáticos para todo o período analisado, o *E*% dos fatores de manejo destaca a sua impotância na variação da WPa.

4.5 Conclusão

Este estudo fornece bases para explorar maneiras de melhorias da produtividade da água em áreas sob condições de sequeiros, cenário encontrado para a maioria das áreas cultivadas com cana-de-açúcar no Brasil, e em um estado no qual a disponibilidade hídrica é considerada pelos produtores ser a causa da variação interanual da produtividade.

Avaliar a produtividade da cana-de-açúcar para um talhão específico atingir Yw a partir da mesma quantidade de água consumida pela cultura para atingir Ya, fornece uma função estimada da WP a partir da regressão linear, possibilitando o cálculo do Yg da água intrínseco à cada talhão.

Os resultados sugerem a necessidade de melhorias nas práticas de manejo para aumento da WPa. Embora as principais causas da variação de WPa sejam devidos aos fatores climáticos para o período de 2013-2017, os fatores de manejo atuam com importantes influenciadores na variabilidade da WPa, uma vez que elas foram atribuídas como sendo a principal causa de variação da WPa para os anos 2013 e 2014.

Dependendo de seus objetivos, a usina pode obter incremento na WPa das seguintes maneiras: (I) diminuindo o Yg no mesmo nível que o consumo de água, por exemplo melhorando as práticas de manejo, além da implementação de melhorias no controle de pragas e plantas daninhas, (II) introdução de um sistema de irrigação e (III) combinando essas duas abordagens.

REFERÊNCIAS

ALLEN, Richard G. et al. Crop evapotranspiration -Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ALI, M. H. Weather: A driving force in determining irrigation demand. In: Fundamentals of Irrigation and On-farm Water Management: Volume 1. Springer, New York, NY, p. 31-105.2010.

AQUASTAT (FAO's Information System on Water and Agriculture), 2017. Brazil: geography and population. Available from: http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results. html (acessed 02.19.20).

BERNDES, GÖRAN. Bioenergy and water—the implications of large-scale bioenergy production for water use and supply. Global environmental change, v. 12, n. 4, p. 253-271, 2002.

BEZUIDENHOUT, C. N., LECLER, N. L., GERS, C., LYNE, P. W. L. Regional-based estimates of water use for commercial sugarcane in South Africa. Water SA, v. 32, n. 1, 2006.

BRUMBLEY, S. M., SNYMAN, S. J., GNANASAMBANDAM, A., JOYCE, P., HERMAN, S. R., da SILVA, J. A. G., MCQUALTER, R. B., WANG, M., EGAN, B. T., PATTERSON, A. H., et al. Sugarcane. In: Kole, C., Hall, T. C. (Eds). Compendium of Transgenic Crop Plants: Transgenic Sugar. Tuber and Fiber Crops, Blackwell Publishing Ltd. 2008.

CABRAL, O.M.R. ET AL. "Fluxes of CO2 above a sugarcane plantation in Brazil." Agricultural and Forest Meteorology 182-183: 54–56. 2013.

CARR, M. K. V.; KNOX, Jerry W. The water relations and irrigation requirements of sugar cane (Saccharum officinarum): a review. Experimental Agriculture, v. 47, n. 1, p. 1-25, 2011.

CHERUBIN, M. R., KARLEN, D. L., Franco, A. L., TORMENA, C. A., Cerri, C. E., Davies, C. A., & CERRI, C. C. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. Geoderma, 267, 156-168. 2016.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 24. Land and Water Development Division, FAO, Rome, v. 144, 1977.

DINARDO-MIRANDA, L. L., & FRACASSO, J. V. Sugarcane straw and the populations of pests and nematodes. Scientia Agricola, 70(5), 305-310. 2013.

EFEOĞLU, B.; EKMEKÇI, Y.; ÇIÇEK, N. Erratum to "Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery" [South African Journal of Botany 75 (2009) 34-42] (DOI:10.1016/j.sajb.2008.06.005) South African Journal of Botany, abr. 2009.

EKSTEEN, A., SINGELS, A., AND NGXALIWE, S. “Water relations of two contrasting sugarcane genotypes.” Field Crops Research 168, 86–100. 2014.

EVANS, L. T. Crop Evolution, Adaptation, and Yield. Cambridge University Press, Cambridge, UK.1993.

GOLDEMBERG, J., 2007. Ethanol for a sustainable energy future. Science 315, 808-810.

GOLDEMBERG, José et al. Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. Energy Policy, v. 69, p. 14-18, 2014.

GRASSINI, P.; HALL, A. J.; MERCAU, J. L. Benchmarking sunflower water productivity in semiarid environments. Field Crops Research, v. 110, n. 3, p. 251–262, fev 28. 2009.

HELLEGERS, P. J. G. J. et al. Combining remote sensing and economic analysis to support decisions that affect water productivity. Irrigation Science, v. 27, n. 3, p. 243-251, 2009.

HOWELL, T. A. Challenges in increasing water use efficiency in irrigated agriculture. 2006. Disponível em: <http://www.cprl.ars.usda.gov>. Access in: nov 19. 2019.

HU, G., ZHAO, W. &WU, J. Gray correlative analysis of wheat water productivity and impact factors in oasis irrigation districts. J. Desert Res. 30(2), 369-375. 2010.

INMAN-BAMBER, N. G., & SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. Field crops research, 92(2-3), 185-202. 2005.

LATA, Suman. Measurement of Agricultural Productivity and Water Productivity of Crops. In: Irrigation Water Management for Agricultural Development in Uttar Pradesh, India. Springer, Cham, 2019. p. 253-314.

LI, X., ZHANG, X., NIU, J., TONG, L., KANG, S., DU, T., LI, S. & DING, R. Irrigation water productivity is more influenced by agronomic practice factors than by climatic factors in Hexi Corridor, Northwest China. Scientific reports, v. 6, p. 37971, 2016.

MARIN, F. R., JONES, J. W., ROYCE, F., SUGUITANI, C., DONZELLI, J. L., PALLONE, W., NASSIF, D. S. P. 2011 Parametrization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian sugarcane. Agronomy Journal 103: 304-311.

MARIN, F. R.; JONES, J. W. Process-based simple model for simulating sugarcane growth and production. Scientia Agricola, v. 71, n. 1, p. 1-16, 2014.

MARIN, F. R., THORNBURN, P. J., NASSIF, D. S. P., COSTA, L. G. Sugarcane model intercomparison: Structural differences and uncertainties under current and potential future climates. Environmental Modelling & Software, v. 72, p. 372–386, 2015.

MARIN, F. R., MARTHA, G. B., CASSMAN, K. G., GRASSINI, P. Prospects for increasing sugarcane and bioethanol production on existing crop area in Brazil. BioScience, v. 66, n. 4, p. 307-316, 2016.

MARIN, F. R., EDREIRA, J. I. R., ANDRADE J., GRASSINI, P. On-farm sugarcane yield and yield components as influenced by number of harvests. Field Crops Research, v. 240, p. 134-142, 2019.

MEVIK, B.H., WEHRENS, R. The pls package: principal component and partial least squares regression in R. 2007.

MEYER, W. S. The irrigation experience from Australia. In Intensive Sugarcane Production (Eds B. A. Keating and J. R. Wilson), 437-454, Wallingford, UK: CAB International, 1977.

NUTTONSON, M. Y. Wheat Climate Relationshipand Use of Phenology in Ascertaining the Thermal and Photothermal Requirements of Wheat. American Institute of Crop Ecology, Washington DC, 1955.

OTTO, R., SILVA, A. D., FRANCO, H. C. J., OLIVEIRA, E. D., & TRIVELIN, P. C. O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. Soil and tillage research, 117, 201-210. 2011.

PISCHKE, ERIN C. et al. From Kyoto to Paris: measuring renewable energy policy regimes in Argentina, Brazil, Canada, Mexico and the United States. Energy Research & Social Science, v. 50, p. 82-91, 2019.

PRADO, H. Solos do Brasil – gênese, morfologia, classificação, levantamento e manejo. 281p, Piracicaba, 2005.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. Monthly Weather Review, v. 100, n. 2, p. 81–92, fev. 1972.

RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water resources research, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, 1972.

RITCHIE, J.T. Soil water balance and plant water stress. p. 41-53. In: Tsuji, G.Y.; Hoogenboom, G.; Thornton, P.K., eds. Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic, Dordrecht, Netherlands, 1998.

ROCKSTRÖM, J.; BARRON, J. Water productivity in rainfed systems: overview of challenges and analysis of opportunities in water scarcity prone savannahs. Irrigation Science, v. 25, n. 3, p. 299-311, 2007.

SANTOS, F. S. Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e álcool: tecnologia e perspectivas. UFV, 2010.

SCARPARE, F. V., HERNANDES, T. A. D., RUIZ-CORRÊA, S. T., KOLLN, O. T., de CASTRO GAVA, G. J., dos SANTOS, L. N. S., & VICTORIA, R. L. Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: Tietê/Jacaré watershed assessment. Journal of cleaner production, v. 112, p. 4576-4584, 2015.

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. F. Sugarcane land use and water resources assessment in the expansion area in Brazil. Journal of cleaner production, v. 133, p. 1318-1327, 2016.

SILVA, A. L. B. O. Produção e eficiência no uso da água de quatro cultivares de cana-de-açúcar irrigadas por gotejamento subsuperficial em Campinas, SP. Tese de doutorado. Instituto Agronômico, 2014.

SINGELS, A., JONES, M., VAN DEN BERG M. DSSAT v4.5-Canegro Sugarcane Plant Module. South African Sugarcane Research Institute, 2008.

TEIXEIRA, AH de C. et al. Sugarcane Water Productivity Assessments in the São Paulo state, Brazil. Embrapa Territorial-Artigo em periódico indexado (ALICE), 2016.

TEJERA, N.A.; RODES, R., ORTEGA, E., CAMPOS, R., AND LLUCH, C. “Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars.” Field Crops Research 102, 64–72. 2007.

VAN ITTERSUM, M. K., CASSMAN, K. G., GRASSINI, P., WOLF, J., TITTONELL, P., & HOCHMAN, Z. Yield gap analysis with local to global relevance—a review. Field Crops Research, v. 143, p. 4-17, 2013.

WALLACE, J. S. Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production. Agriculture, Ecosystems and Environment, v. 82, n. 1–3, p. 105–119, 2000.

WALTER, Arnaldo et al. Brazilian sugarcane ethanol: developments so far and challenges for the future. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, v. 3, n. 1, p. 70-92, 2014.

ZHENG, S. J.; YANG, J. L. Target sites of aluminum phytotoxicity. Biologia Plantarum, set. 2005.