



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Benefícios Ambientais Proporcionados pela Agricultura de Precisão na Colheita Mecanizada da Cana-de-açúcar

Luan de Jesus Rosa¹, Claudemiro de Lima Júnior², Márcia Rejane Oliveira Barros Carvalho Macedo³

¹Universidade de Pernambuco (UPE) – Campus Petrolina, Rodovia BR 203, Km 2 s/n - Vila Eduardo, Petrolina - PE, 56328-900. E-mail: luandrade.eng@gmail.com ²Universidade de Pernambuco (UPE) – Campus Petrolina, Rodovia BR 203, Km 2 s/n - Vila Eduardo, Petrolina - PE, 56328-900, claudemiro.lima@upe.br (autor correspondente).

Artigo recebido em 03/10/2023 e aceito em 16/05/2024

RESUMO

Visando a melhoria da qualidade do ar e mitigação dos impactos ambientais, a substituição da queima da palhada da cana-de-açúcar pela colheita mecanizada tem ganhado destaque. A adoção de colhedoras é também uma alternativa para escassez de mão de obra, proporcionando benefícios econômicos e ambientais. No entanto, o uso de máquinas na lavoura pode causar problemas como compactação do solo, danos à soqueira e perdas de matéria-prima. Para abordar esses desafios, a Agricultura de Precisão (AP) surge como uma solução. Por meio do autodirecionamento por piloto automático, é possível implementar o tráfego controlado de máquinas, minimizar danos à plantação e otimizar a operação de colheita. Sendo assim, essa pesquisa buscou avaliar as perdas de matéria-prima na colheita mecanizada de cana-de-açúcar usando colhedoras autopropelidas, comparando o uso de tecnologias georreferenciadas e piloto automático em dois anos diferentes. Realizado na usina Agrovale, localizada em Juazeiro-Bahia, o estudo utilizou um drone para mapear a área de plantio comercial de cana-de-açúcar e gerar trajetórias precisas para as colhedoras. Os resultados revelaram uma redução significativa de 4,39% nas perdas de matéria-prima em 2020, em comparação com 2019 quando não houve o mapeamento. Isso destaca a importância das geotecnologias na agricultura, melhorando a eficiência das colhedoras, aumentando os retornos financeiros e contribuindo para benefícios ambientais por meio do aproveitamento máximo dos recursos colhidos. Portanto, a combinação de colheita mecanizada, Agricultura de Precisão e geotecnologias demonstra grande potencial para promover práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes.

Palavras-chave: colhedora, VANT, mapeamento, geotecnologias.

Environmental Benefits Provided by Precision Agriculture in Mechanized Harvesting of Sugarcane

ABSTRACT

With a view to improving air quality and mitigating environmental impacts, replacing the burning of sugarcane straw with mechanized harvesting has gained prominence. The adoption of harvesters is also an alternative to the shortage of labor, providing economic and environmental benefits. However, the use of machines in farming can cause problems such as soil compaction, damage to stumps and loss of raw material. To address these challenges, Precision Agriculture (PA) emerges as a solution. Through self-steering by autopilot, it is possible to implement controlled machine traffic, minimize damage to the plantation and optimize the harvesting operation. Therefore, this research sought to evaluate raw material losses in mechanized sugarcane harvesting using self-propelled harvesters, comparing the use of georeferenced technologies and automatic pilot in two different years. Conducted at the Agrovale plant, located in Juazeiro-Bahia, the study used a drone to map the commercial sugarcane planting area and generate precise trajectories for the harvesters. The results revealed a significant reduction of 4.39% in raw material losses in 2020, compared to 2019 when there was no mapping. This highlights the importance of geotechnologies in agriculture, improving harvester efficiency, increasing financial returns and contributing to environmental benefits through making the most of harvested resources. Therefore, the combination of mechanized harvesting, Precision Agriculture and geotechnologies shows great potential to promote more sustainable and efficient agricultural practices.

Keywords: harvester, UAV, mapping, geotechnologies.

Introdução

Atualmente o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo com área cultivada de 8,317 milhões de hectares e uma produção de 585,2 milhões de toneladas colhidas na safra 2021/2022, uma redução de 3,5% na área cultivada e 10,6% no volume de matéria-prima, em relação ao ciclo anterior. O açúcar destaca-se como o principal item produzido por essa cultura, enquanto o setor debiocombustíveis é mais um beneficiado pela cana-de-açúcar, sendo uma alternativa de fonte de energia. Além disso, a cana-de-açúcar gera subprodutos como energia, vinhaça e bagaço, estes dois últimos podendo retornar ao campo na forma de fertilizantes (Conab, 2022).

Segundo o Balanço Energético Nacional (Ben, 2021), a cana-de-açúcar é a principal fonte de energia renovável do Brasil em que a biomassa de cana corresponde a 19,1% da energia ofertada no país e 39,5% da energia renovável consumida pelos brasileiros. Para Pelosi (2020), o setor sucroalcooleiro tem importante participação na economia brasileira, contribuindo para a geração de empregos e renda de forma direta e indireta para as regiões em que é desenvolvido o plantio da cana.

O setor canavieiro tem como característica a adoção de ciência e tecnologia no seu método de produção da cana-de-açúcar, através do preparo, plantio e colheita dessa cultura, visando sustentabilidade ambiental e econômica, o que implicou amplos investimentos nas últimas décadas, despertando o interesse do mercado em expandir novas tecnologias para essa atividade (Barreto, 2020).

A colheita mecanizada é uma das evoluções empregadas nas operações de cultivo da cana, substituindo o método de colheita manual pela adoção de máquinas que dispõem diversos pacotes tecnológicos, tais como regulador de corte de base, controle de fluxo de óleo e sistema de autodirecionamento por piloto automático (Lançon, 2020).

A escassez de mão de obra para o corte manual torna a colheita mecanizada uma alternativa capaz de suprir essa demanda, sendo uma atividade de menor impacto ambiental, pois não exige o emprego do fogo, apresentando-se como uma operação economicamente viável e operacionalmente eficiente. Para isso, têm-se investido em tecnologias como Agricultura de Precisão (Batista, 2020).

A Agricultura de Precisão (AP) passou a ser difundida a partir dos anos 2000 com a disponibilização do Sistema Global de Navegação por Satélites (GNSS) à comunidade civil. Assim, diversos avanços foram impulsionados, tais como tecnologias de máquinas, equipamentos e sensores para o georreferenciamento e mapeamento das variabilidades das lavouras, contribuindo para os processos de plantio, pulverização e colheita, permitindo o uso do piloto automático (Basso et al., 2019).

A utilização do piloto automático na colheita mecanizada da cana-de-açúcar permite que as máquinas

realizem manobras dentro de uma aceleração contínua, diminuído o consumo de combustível. A condução da colhedora de forma sem autodirecionamento pode elevar as perdas de matéria-prima e pisoteio na soqueira, o que irá impactar no desenvolvimento do canavial nas safras seguintes, refletindo em produtividade (Vasconcello et al., 2018).

A colheita mecanizada conduzida sem autodirecionamento gera a fadiga nos operadores e reduz o volume de matéria-prima colhida por máquina, sendo minimizado pela utilização do piloto automático nas áreas que possuem mapeamento, permitindo redução de manobras e consequentemente o consumo de combustíveis (Mazzi, 2023).

A AP pode ser utilizada como fundamentação para tomada de decisão sobre uma lavoura, auxiliando os técnicos e produtores na gestão de insumos, manejo e equipamentos agrícolas, visando elevação de produtividade, operações conservacionistas e uso racional de suprimentos (Noetzold et al., 2019).

Dentre as tecnologias empregadas na AP, destacam-se o Sistema Global de Navegação por Satélites, Sistema de Informações Geográficas (SIG), Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto (SR), permitindo gerar dados para o gerenciamento mais assertivo no campo (SENAR, 2018).

O sensoriamento remoto na agricultura é aplicado a partir da interação da energia eletromagnética com o solo ou a planta, em que sensores captam as radiações refletidas ou emitidas nas lavouras, através de satélites, aviões, sensores portáteis embarcados em máquinas agrícolas e veículos aéreos não tripulados (VANTs) (Cavalcante et al., 2022).

Os VANTs são capazes de gerar dados de sensoriamento remoto em alta resolução espacial e temporal, de acordo com as finalidades de levantamento. A obtenção dos dados de campo é efetuada a partir da integração do VANT com equipamentos fotogramétricos, sistema de posicionamento, momento e intensidade desejada (Maes et al., 2019). Em levantamentos que exigem acurácia posicional são utilizados receptores GNSS e métodos de rastreamento geodésicos, a fim de melhorar a precisão das coordenadas das imagens capturadas pelo VANT (Silva et al., 2022). Esse procedimento é realizado a partir das técnicas de geoprocessamento, ajustando a precisão das imagens dos VANTs em função das coordenadas fornecidas pelos receptores GNSS, permitindo gerar produtos cartográficos, tais como, modelo digital de superfície, curvas de nível e ortomosaico georreferenciado (Reips e Gubert, 2019). A partir do ortomosaico é possível produzir informações com a localização espacial e efetuar o mapeamento da área, por exemplo, cerca, talhões, drenagem e vetorização das linhas de plantio, com alta resolução espacial (EMBRAPA, 2019).

Os autores Visala et al. (2020), Rallo et al. (2020), Castro et al. (2020) e Santesteban et al. (2020) utilizaram a técnica de análise de imagem baseada em objeto (OBIA) a partir de imagens capturadas por VANT, possibilitando a

identificação dos objetos desejados, com suas respectivas coordenadas, de forma automatizada, por meio de softwares computacionais. Enquanto Freeland et al. (2019) utilizou as imagens obtidas por um VANT para identificação visual de elementos agrícolas a partir do ortomosaico georreferenciado, permitindo a vetorização das linhas de drenagem para transformação em mapa. A fim de melhorar o gerenciamento das lavouras, novas tecnologias como o uso de VANTs são utilizadas para extrair informações e para tomadas de decisões mais assertivas no campo.

Através dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), o Brasil propôs modernizar a tecnologia, expandir a infraestrutura e adaptar as indústrias para torná-las sustentáveis com maior eficiência, a partir da adoção de tecnologias e processos menos agressivos ao meio ambiente, reduzindo emissões de Gases do Efeito Estufa.

Produtos derivados da cana-de-açúcar como bagaço, palha e etanol são fontes de energia sustentáveis que atendem a agenda mundial de elevar até 2030 a participação de energias renováveis na matriz energética nacional. O etanol é uma alternativa de energia renovável em substituição aos combustíveis fósseis, atendendo aos compromissos globais de redução dos gases do efeito estufa (Martins et al., 2018).

O reaproveitamento dos rejeitos da cana-de-açúcar seja pra geração de energia, adubação ou irrigação, promovem a industrialização sustentável e inovação a partir de resíduos e restos culturais da cana. Por meio dos ODS, o país assumiu o compromisso de aumentar a produtividade agrícola, bem como garantir

sistemas sustentáveis de produção alimentar que visem melhorar a qualidade da terra, do solo, da água e do ar. Além disso, o Brasil se comprometeu a reduzir as perdas de alimentos durante o ciclo de produção e abastecimento, incluindo as perdas pós-colheita.

Assim, essa pesquisa comparou, no período de duas safras agrícolas, o quantitativo de perdas de matéria-prima da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, adotando diferentes colhedoras de mesmo modelo, sem o uso do projeto de colheita e com o uso do projeto de colheita georreferenciado através de VANT.

Material e métodos

Área de Estudo

O estudo foi conduzido em uma área comercial de 89,70 ha de cana-de-açúcar sob irrigação plena no campo São Jorge pertencente à usina Agro Indústrias do Vale do São Francisco (Agrovale), localizada no município de Juazeiro-Ba (Figura 1), cujas coordenadas geográficas são 9°27'20"S e 40°26'22"W e altitude média de 380 m acima do nível do mar. O clima da região é classificado como "BSwh" (Semiárido quente), conforme a classificação de Köppen (Alvares, 2013). A precipitação média anual é de varia entre 400 a 600 mm (INMET, 2023), com temperatura média anual de 26 °C e chuvas espaçadas na forma de aguaceiros, concentradas no período de novembro a abril. A topografia da área possui declividade média inferior a 1%, classificada como plana. O solo da área é classificado como Cambissolo, com textura do tipo Franco Argilosa (28,31% areia, 32,32% silte e 39,37% de argila) (EMBRAPA, 2018).

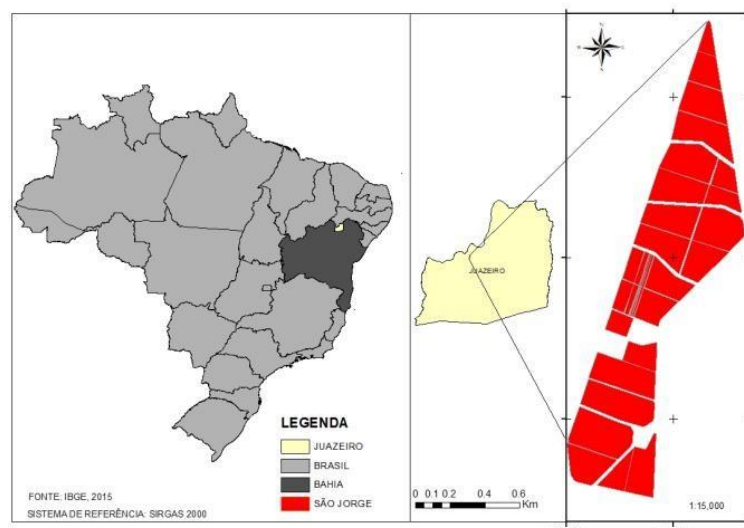


Figura 1. Localização do campo São Jorge em Juazeiro, Bahia, Região Nordeste do Brasil.

Fluxograma da Metodologia

As metodologias adotadas nos dois anos desta pesquisa estão apresentadas na Figura 2.

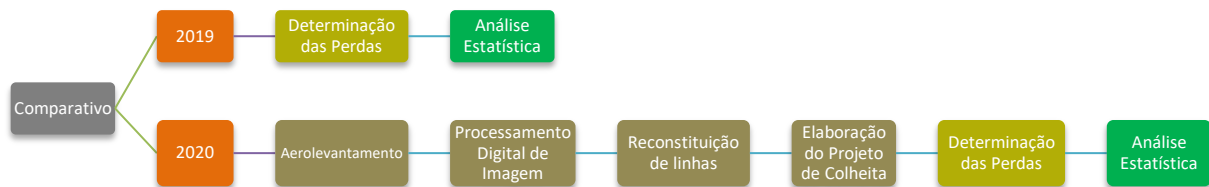


Figura 2. Fluxo das etapas da metodologia para cada ano analisado

Material Vegetal

A cultivar utilizada foi a VAT-90-212, no nono e décimo corte, respectivamente para os anos de 2019 e 2020. A idade média do canavial no primeiro ano foi de 11,6 meses e 10,6 meses para o ano seguinte. O espaçamento entre linhas do campo São Jorge é 2,0 m no sistema duplo alternado (0,70 entre fileira simples e 1,30 entre fileira dupla), sendo irrigado no sistema de gotejamento subsuperficial a partir da mangueira central entre fileiras simples, enterradas a uma profundidade média de 20 cm com vazão nominal de 1 L.h⁻¹.

A cultivar utilizada apresenta como características alto potencial produtivo, bom perfilhamento, porte ereto, diâmetro médio, coloração verde-arroxeadas, bainhas semiabertas, fácil despilha, indução a florescimento e boa rebrota da soqueira (Neto, 2009).

Aquisição de dados (Aerolevanteamento)

Para a aquisição das imagens aéreas foi utilizado um VANT, modelo DJI *Mavic 2 Pro*, acoplado com câmera RGB (sensor de 1" CMOS e *Pixels* Efetivos: 20 megapixels), integrado com GNSS e velocidade média de voo de 36 km.h⁻¹. O aerolevanteamento georreferenciado da área foi executado num único dia de campo, em 19 de outubro de 2019, com idade média do canavial de 60 dias após a colheita (DAC), estágio em que a rebrota da cana atingiu o perfilhamento.

O aerolevanteamento do canavial foi efetuado a partir dos planos de voos autônomos elaborados no *software* DroneDeploy®, onde foram

definidas as configurações de imagens, limite da área mapeada, rota e a altura de voo, padronizada em 100 m para este levantamento, respeitando o espaço aéreo brasileiro conforme exigências do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), resultando numa resolução espacial das imagens de 2,3 cm por *pixel*. Os voos foram executados durante o período do dia com boas condições atmosféricas, entre as 10:00 h e 14:00 h, por questões de luminosidades, a fim de evitar interferência na qualidade das imagens. Os mapeamentos seguiram as seguintes configurações de sobreposição: recobrimento frontal de 70% e lateral de 65%.

Visando elevar a acurácia posicional do mapeamento aéreo, foram utilizados pontos de controle no processamento das imagens. Para a obtenção das coordenadas dos pontos de controle, utilizou-se um receptor GNSS com correção de sinal RTK, modelo Trimble R8S, capaz de rastrear as constelações de satélites GPS e GLONASS. A precisão horizontal do receptor GNSS é de 8 mm, enquanto a precisão vertical é de 15 mm (Santiago e Cintra, 2023).

Para a demarcação dos pontos de controle no terreno, foram implantados 8 alvos planejados e bem distribuídos, previamente sinalizados no terreno entre as estradas internas e perímetro do campo São Jorge. Para isso, utilizou-se tinta cal branca para sinalização em formato de cruz dos pontos fotointerferíveis, conforme Figura 3.



Figura 3. Levantamento geodésico com receptor GNSS do ponto de controle implantado no carreador do campo São Jorge

Processamento Digital de Imagem (PDI)

O processamento digital das imagens obtidas pelo sensor espectral, acoplado ao VANT, foi elaborado com a utilização do *software Agisoft Metashape Professional 1.5®*, sendo executadas as seguintes etapas, conforme proposto por Moreira et al. (2022): a) inserção das imagens; b) alinhamento das câmeras; c) inserção dos pontos de controle nas imagens; d) calibração/adaptação das câmeras; e) geração da nuvem de pontos; f) Confecção do Ortomosaico Georreferenciado. Essa etapa permitiu o emprego de técnicas de fotogrametria digital a partir de um sistema de processamento de dados automatizado.

Reconstituição de linhas e elaboração do projeto de colheita

Posteriormente a elaboração do ortomosaico georreferenciado, foi executada a vetorização das linhas de plantio da cana-de-açúcar e definição dos perímetros dos talhões. Para isso, foram utilizadas as funções de desenho do *software AutoCAD® Civil 3D* em que cada fileira de plantio identificada no ortomosaico correspondeu a uma linha do projeto de colheita, caracterizada como a faixa a ser percorrida pelas colhedoras a partir do sistema de

autodirecionamento por GNSS, de forma que esses maquinários pudessem executar fielmente as assimetrias das entrelinhas do canavial.

Após a vetorização das feições do campo São Jorge, foi elaborado o projeto de colheita mecanizada utilizando o *software AgroCAD®*. Utilizou-se a ferramenta de otimização das linhas entre diferentes talhões que possuíam o mesmo alinhamento, diminuindo o número de manobras e aumentando a eficiência das colhedoras. Por fim, os dados foram exportados como projeto de colheita no formato de arquivo GS32630 suportados pelo monitor *GreenStar™ 3 2630* das colhedoras JohnDeere.

Especificação das colhedoras de cana

No estudo foram utilizadas três colhedoras de cana autopropelidas da marca John Deere em que todas possuíam o mesmo modelo, conforme Quadro 1. O modelo utilizado dispõe de receptor GNSS, bem como do sistema de piloto automático, sendo estas tecnologias embarcadas nos maquinários, por meio das quais é possível empregar técnicas de agricultura de precisão. Apesar das colhedoras disponibilizarem o sistema de piloto automático, no ano de 2019 a operação de colheita não utilizou do projeto de colheita georreferenciado, sendo uma prática da Agrovale, passando a ser adotado no ano de 2020.

Quadro 1. Especificações técnicas das colhedoras autopropelidas avaliadas no estudo

Modelo	Potência (cv)	Motor	Ano de Fabricação	Tecnologia GNSS	Rodado	Espaçamento
CH670	380	6090T	2016	Sim	Esteiras	Duplo

Fonte: John Deere (2022).

Segundo a fabricante de máquinas John Deere (2022), a colhedora modelo CH670 é desenvolvida para colheita de duas linhas de plantio de cana-de-açúcar com espaçamento alternado (0,9 x 1,5m), este modelo de colhedora possui o cortador de base orientado para o centro da máquina, acionado por um motor bomba de pistão hidráulico, com quatro engrenagens de forma a equilibrar a carga.

A fabricante John Deere possui um sistema de Soluções de Gestão Agrícola (AMS) que dispõe de diferentes sinais de correção GNSS, denominados StarFire (SF), dentre eles o SF1, SF2 e SF3, além do sinal *Real Time Kinematic* (RTK) cuja precisão horizontal é +/- 2,5 cm (John Deere, 2022). Para esse estudo, as colhedoras de cana utilizaram o receptor GNSS StarFire™6000, esse equipamento possui 252 canais e rastreia as constelações de satélites GPS e GLONASS segundo a John Deere (2022). Além disso, o receptor GNSS StarFire™6000 suporta o sinal de correção RTK, o qual foi utilizado pelas colhedoras.

As colhedoras utilizadas nesse trabalho possuíam o monitor de bordo modelo GreenStar™3 2630, por meio do qual é possível obter os dados coletados, informações sobre a máquina e programar as operações a serem executadas no campo (John Deere, 2022). As rotas definidas através dos *softwares* de desenho foram executadas pelas colhedoras a partir do sistema de direcionamento automático AutoTrac™, via satélite, sem interferência humana da linha planejada.

Durante a colheita, as máquinas operaram em condições reais de campo com velocidade média de 3,0 km h⁻¹, pressão de corte de base de 1.200 psi e velocidade de rotação do extrator primário de 800 RPM, padrão definido pela usina Agrovale devido às condições operacionais como topografia da área, porte do canavial, tipo de solo e variedade da cana-de-açúcar.

Determinação das perdas

Para os dois anos de estudo dessa pesquisa foi efetuado a determinação das perdas de matéria-prima, adotando a metodologia descrita por Reis (2015), demarcando-se uma área de 10 m² (área da parcela), logo após a colheita, e coletando manualmente o material depositado no interior da área delimitada. Posteriormente, a matéria-prima não colhida foi classificada e pesada utilizando uma balança semi-analítica portátil. Os dados qualitativos analisados após a colheita da cana-de-açúcar adotaram as diferentes classificações de perdas: rebolo repicado, cana inteira, cana em ponta, pedaço fixo, pedaço solto, lasca, estilhaço,

cana em toco e perda total de cana em t.ha⁻¹, conforme Silva et al. (2008).

Para o cálculo dos tipos de perdas em porcentagem, adotou-se a metodologia do Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), dividindo-se o valor obtido em cada classe pela produtividade mais este valor, conforme Equação 1.

$$\text{Perdas (\%)} = \frac{\text{Perdas (t/ha)}}{\text{Perdas (t/ha)} + \text{Produtividade (t/ha)}} \quad (1)$$

Após a determinação dos tipos de perdas, os resultados foram classificados por níveis, adotando a metodologia proposta por Benedini et al. (2009). Assim, foram considerados os seguintes níveis de perdas de matéria-prima: (I) Baixo (< 2,5 % de perdas); (II) Médio (2,5 a 4,5% de perdas); e (III) Alto (> 4,5% de perdas).

Análise estatística

Em campo, os levantamentos foram dirigidos considerando um delineamento inteiramente casualizado (DIC) com nove tratamentos para os dois anos, sendo nove repetições para o ano de 2019 (Colhedoras sem o uso do projeto de colheita) e dez repetições para o ano de 2020 (Colhedoras com o uso do projeto de colheita), totalizando 171 parcelas. Inicialmente os dados foram avaliados no teste de normalidade Shapiro-Wilk e apresentaram distribuição normal. Posteriormente, os dados referentes às classes de perdas foram submetidos à análise de variância (ANOVA), mediante atendimento aos pressupostos da ANOVA. As médias dos pares de perdas foram comparadas pelo teste de Tukey (**p<0,05**). As análises estatísticas foram realizadas através do *software* R, versão 4.1.3 (R Core Team, 2022).

Identificação dos ODS atendidos pela pesquisa

Foram avaliados os dados referentes a quatro ODS, sendo eles ODS2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS7 (Energia Acessível e Limpa), ODS9 (indústria, inovação e infraestrutura) e ODS12 (Consumo e Produção Sustentáveis).

A fim de avaliar o ODS2, foi determinado o percentual de perdas de matéria-prima nos dois anos dessa pesquisa, comparando a produtividade agrícola a partir do implemento de práticas agrônômicas resilientes, como a adoção do projeto de colheita mecanizada georreferenciado.

O ODS7 foi analisado através do volume de etanol possível de ser gerado na indústria da Agrovale, a partir da diferença de perdas de

matéria-prima da cana-de-açúcar comparadas nos anos de 2019 e 2020. Para isso, foi utilizado o Boletim Industrial da Agrovale, com as informações de eficiência da usina, para conversão da diferença de toneladas de cana em litros de álcool, analisados nos dois anos dessa pesquisa.

Os subprodutos da cana-de-açúcar, tais como bagaço, vinhaça e cogeração de energia, foram calculados a partir da diferença de perdas de matéria-prima da cana-de-açúcar avaliadas nos anos de 2019 e 2020 e convertidos para os valores de eficiência disponibilizados no Boletim Industrial da Agrovale, referente à safra 2020. Dessa forma, atendendo o ODS9 (indústria, inovação e infraestrutura).

O ODS12 foi avaliado a partir das perdas de matéria prima da colheita mecanizada de cana-de-açúcar nos diferentes anos de estudo e as diferenças entre eles foram convertidas em sacas de

açúcar (50 kg) a partir das informações de eficiência industrial da Agrovale, determinando a redução de desperdício de alimentos.

Resultados e discussão

Através da Tabela 1, é possível observar que os maiores tipos de perdas encontrados na colheita mecanizada da cana-de-açúcar sem o mapeamento das linhas de plantio são do tipo lasca, pedaço solto e pedaço fixo, respectivamente, correspondendo ao somatório de 63,96% das perdas totais, enquanto tolete repicado, toco e cana em ponta representam 10,31% das perdas totais. O tipo de perda por cana em ponta destoa dos demais por apresentar resultado nulo em todas as amostras coletadas. O rendimento médio do canavial em 2019 foi de 106,03 toneladas de cana por hectare (TCH).

Tabela 1. Estatística descritiva dos tipos de perdas de matéria-prima apresentados pelas colhedoras sem uso do mapeamento das linhas de plantio (2019).

Medidas	PS	L	PF	CI	TR	TC	CP	EST	PT
	Ton ha ⁻¹								
Mínimo	0,73	1,24	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,71	5,95
Média	2,22	2,62	2,21	1,46	0,64	0,50	0,00	1,37	11,01
Mediana	2,11	2,19	1,41	0,00	0,67	0,39	0,00	1,40	11,14
Máximo	5,97	4,53	6,40	9,66	1,03	1,54	0,00	2,06	25,68
DP	1,55	1,22	2,32	3,19	0,27	0,48	0,00	0,37	5,92
CV (%)	69,79	46,70	104,93	218,13	41,88	97,24	0,00	26,92	53,79

LEGENDA: PS, pedaço solto; L, lasca; PF, pedaço fixo; CI, cana inteira; TR, tolete repicado; TC, toco; CP, cana em ponta; EST, estilhaço; PT, perda total; DP, desvio padrão; CV, coeficiente de variação.

A Tabela 2 apresenta os resultados referentes ao ano em que a colheita mecanizada da cana-de-açúcar adotou o mapeamento das linhas de plantio a partir do VANT. As médias dos tipos de perdas em 2020 apresentam valores próximos, havendo uma padronização dos dados. As maiores perdas são respectivamente estilhaço, cana inteira e

tolete repicado que somados correspondem a 55,78% das perdas totais, enquanto as menores perdas encontradas são lasca e cana em ponta, equivalente ao somatório de 12,01% das perdas totais. O rendimento médio do canavial em 2020 foi de 90,01 toneladas de cana por hectare (TCH).

Tabela 2. Estatística descritiva dos tipos de perdas de matéria-prima apresentados pelas colhedoras com o uso do mapeamento das linhas de plantio (2020).

Medidas	PS	L	PF	CI	TR	TC	CP	EST	PT
	Ton ha ⁻¹								
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,00	0,38	1,86
Média	0,47	0,27	0,60	0,86	0,74	0,42	0,28	0,98	4,61
Mediana	0,60	0,34	0,53	0,73	0,89	0,38	0,30	0,90	4,45
Máximo	0,74	0,88	1,74	2,82	1,08	0,62	0,62	1,48	7,03
DP	0,29	0,28	0,68	1,09	0,37	0,15	0,18	0,42	2,06
CV (%)	62,39	103,81	113,21	126,62	49,53	35,81	65,44	42,93	44,59

LEGENDA: PS, pedaço solto; L, lasca; PF, pedaço fixo; CI, cana inteira; TR, tolete repicado; TC, toco; CP, cana em ponta; EST, estilhaço; PT, perda total; DP, desvio padrão; CV, coeficiente de variação.

O tipo de perda por cana inteira foi encontrado

com valores elevados nesse trabalho para ambos os anos

analisados. Tal fato está relacionado à alta produtividade do canavial que impede as touceiras de cana manter o porte ereto, dificultando o corte de base pelas colhedoras.

Santos et al. (2019) verificaram que a perda por cana inteira está associada ao acamamento ou à presença de plantas deitadas. Essa dificuldade limita a visibilidade do operador de colhedora na detecção das linhas de cana, isso é verificado no ano de 2019 em que não houve o mapeamento das linhas de plantio e tal tipo de perda foi maior ($1,46 \text{ ton ha}^{-1}$) quando comparado ao ano de 2020 ($0,86$

ton ha^{-1}) em que foi utilizado o projeto de colheita georreferenciado a partir do mapeamento das linhas de plantio, permitindo o uso do sistema por piloto automático das colhedoras, sem interferência humana no direcionamento da máquina. Alves et al. (2019) encontraram perdas por cana inteira com valores baixos, cultivada em ambiente de sequeiro e atribuíram tal fato ao não acamamento da cana.

Na Figura 4 é possível observar que as principais reduções analisadas são referentes às perdas totais, lasca, pedaço solto e pedaço fixo. As perdas por pedaço solto e lasca também foram observadas com altos valores por Alves et al. (2022) e Peloso et al. (2019).

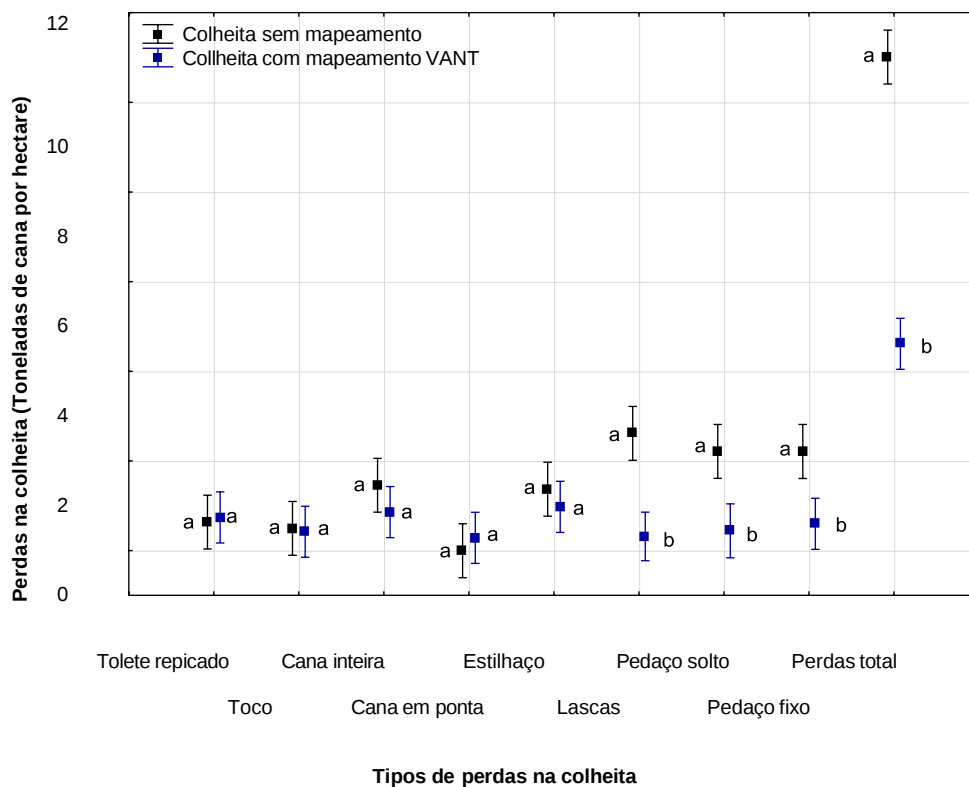


Figura 4. Comparativo das perdas de matéria-prima da colheita mecanizada de cana-de-açúcar sem e com o mapeamento das linhas de plantio. Dados com letras iguais não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de probabilidade $p < 0,05$. Letras minúsculas comparam perdas do mesmo tipo, em diferentes processos de colheita. Fonte: Os autores (2023)

As médias de perdas totais foram de 11,01 ton ha⁻¹ para o ano de 2019, representando 9,22%, e 4,61 ton ha⁻¹ para o ano de 2020, correspondendo a 4,83% das perdas totais avaliadas. Em ambos os anos, as perdas totais foram superiores a 4,5%, sendo classificadas como altas de acordo com Benedini et al. (2009). Os autores Meert et al. (2020) e Santos (2019) encontraram resultados de perdas totais classificadas como alta, associando tal fato a velocidade das colhedoras e ajustes operacionais como rotação dos extratores de impurezas.

No ano de 2020, caracterizado pelo uso do projeto de colheita mecanizada georreferenciado a partir do VANT, ocorreu uma redução de 4,39% nas perdas totais de matéria-prima da cana-de-açúcar no Campo São Jorge, quando comparado à safra anterior, correspondendo a 3,95 TCH. Assim, a adoção da AP na operação de colheita mecanizada da cana-de-açúcar permitiu o incremento de 354,44 toneladas de cana-de-açúcar (TC) no rendimento agrícola do campo em estudo e consequentemente o aumento de produção dos derivados da cana.

Segundo os dados do Boletim Industrial da Agrovale, referente à safra 2020, 83,69% da cana moída foi destinado à transformação da matéria-prima em açúcar, enquanto 16,31% da produção industrial teve como finalidade o álcool. Dessa forma, 296,63 TC a

mais puderam ser processadas em açúcar, ao passo que 57,81 TC foram beneficiadas para a produção de álcool, em consequência da utilização do projeto de colheita mecanizada georreferenciado.

Diante das informações de eficiência industrial da usina, alusivo a safra 2020, o valor de açúcar equivalente correspondeu a 2,5 sacas portonelada de cana (SC/TON), com isso o incremento no rendimento agrícola admitiu a produção de 741,575 sacas de 50 kg de açúcar. O valor da saca de açúcar, negociado pelo mercado interno de Pernambuco (região de referência) foi de R\$ 154,36 para o mês de julho de 2022, segundo o Indicador Mensal do Açúcar CEPEA/ESALQ. Dessa forma, a utilização da AP na colheita mecanizada do campo São Jorge permitiu uma receita de R\$ 114.469,517 com a venda do açúcar.

No processo de clarificação do caldo da cana para a produção do açúcar é gerado a torta de filtro, material sólido oriundo das impurezas em suspensão dos decantadores (lodo da decantação) e composto por restos de bagaço (Da Silva et al., 2021). A partir da produção de açúcar gerada no ano de 2020 com o ganho em TC pela AP, é possível gerar 7.139,88 kg de torta de filtro, uma vez que o rendimento industrial, no mesmo período, foi de 24,07 kg de torta por tonelada de cana (kg/ton).

Tabela 3. Análise química da torta de filtro

(H ₂ O) 1:2,5	g / kg	Teor(%)	Teor de Matéria Seca (g / kg)							Teor de Matéria Seca (mg / kg)					
PH	M. O.	Umidade	N	P	K	Ca	Mg	C	C/N	Na	Cu	Fe	Mn	Zn	B
8,9	640	75	11,9	2,9	2,5	49,9	6,0	37,1	31/1	250	45	8100	848	180	16

LEGENDA: PH, potencial hidrogênico; M. O., matéria orgânica; N, nitrogênio; P, fósforo; K, potássio; Ca, cálcio; Mg, magnésio; C, carbono; Na, sódio; Cu, cobre; Fe, ferro; Mn, manganês; Zn, zinco; B, boro.

A partir dos valores obtidos na análise química da torta de filtro (Tabela 3), observam-se altos teores de matéria orgânica e umidade na composição desse material. O aumento nos preços dos fertilizantes, decorrente da crise global e da escassez de insumos, apresenta desafios significativos para o setor agrícola e a produção de alimentos. Nesse contexto, a torta de filtro tem emergido como uma alternativa viável aos fertilizantes minerais, pois aumenta a retenção de água na lavoura, eleva a disponibilização de nutrientes às plantas e melhora a composição física, química e biológica do solo (EMBRAPA, 2022).

De acordo com Nicchio (2020), os principais macronutrientes utilizados na adubação da cana-de-açúcar são o nitrogênio, fósforo e potássio (NPK), em que as doses a serem aplicadas variam com o ciclo e estágio da cultura. Os valores de NPK foram encontrados em baixos teores na torta de filtro, respectivamente 1,19%, 0,29% e 0,25%, correspondendo a 84,96 kg de N, 20,71 kg de P e 17,85 kg de K, oriundo do incremento de TC pela AP. Por conta disso, a torta de filtro pode ser incorporada ao bagaço da cana no processo de compostagem,

retornando a lavoura na forma de fertilizante organomineral ou aplicado direto no sulco de plantio (Mialichi Júnior et al., 2021). A torta de filtro pode ser aplicada no sulco de plantio, por apresentar umidade entre 70 a 80%, permitindo plantar a cana-de-açúcar no período de estiagem, garantindo boa brotação (Aquino et al., 2018).

Na safra 2020, a indústria da Agrovale gerou 77,62 litros de álcool por tonelada de cana (l.tc⁻¹). O ganho de rendimento pela AP do Campo São Jorge destinado à produção do etanol possibilitou gerar 4.487,21 litros desse combustível. O valor do álcool negociado na região de Pernambuco no mês de maio de 2022 foi de R\$ 3,8282 por litro, segundo o Indicador Mensal do Etanol Hidratado CEPEA/ESALQ. Assim, a metodologia aplicada na colheita mecanizada no campo em estudo permitiu gerar um faturamento de R\$ 17.177,94, a partir da venda do álcool.

No processo de produção do álcool, um subproduto é gerado pela agroindústria a partir da destilação dos vinhos em que se recupera o álcool produzido, resultando a vinhaça. Esse resíduo tem como principal constituinte a matéria orgânica e em

menor quantidade nutrientes que podem ser absorvidos pelas plantas como K, Ca e Mg (Rodrigues et al., 2020). Apesar de sua consistência líquida, a vinhaça é considerada um resíduo sólido segundo a NBR 10.004 da ABNT (2004). Para Marafon et al. (2020), Wilkie et al. (2020) e Silva et al. (2019) a proporção de vinhaça produzida varia entre 12 a 18 vezes o volume do álcool

gerado pelas indústrias. Considerando um valor médio de 15 litros de vinhaça produzido para cada litro de álcool, a partir do volume desse combustível gerado pelo benefício da AP, é possível obter 67,31 m³ de vinhaça, a qual pode ser retornada ao canavial na forma de fertilizante, conforme análise química da Tabela 4.

Tabela 4 Análise química da vinhaça

Determinações (mg/L)												
PH	DBO	DQO	N	P	K	Ca	Mg	C	Cu	Fe	Mn	Zn
4.46	29.300	45.200	630	160	1.880	1.089	842	11.200	0.64	56.10	4.07	14.41

LEGENDA: PH, potencial hidrogênico; DBO, demanda bioquímica de oxigênio; DQO, demanda química de oxigênio; N, nitrogênio; P, fósforo; K, potássio; Ca, cálcio; Mg, magnésio; C, carbono; Cu, cobre; Fe, ferro; Mn, manganês; Zn, zinco.

Os valores de NPK encontrados na Tabela 4 apresentam teores discrepantes, sendo o potássio o macronutriente de maior concentração encontrado na vinhaça. A partir do incremento de TC pela AP, por meio do volume total de vinhaça produzido, é possível obter 42,41 kg de N, 10,77 kg de P e 126,54 kg de K. Além desses, os micronutrientes cálcio e magnésio, responsáveis pelo enraizamento das culturas, corresponderam a 73,30 kg e 56,68 kg, respectivamente, produzidos pela vinhaça. As portarias do Ministério do Interior nº 323 de 1978 (BRASIL, 1978) e nº 158, de 1980 (BRASIL, 1980), proíbem do lançamento direto e indireto da vinhaça em qualquer corpo hídrico pelas destilarias de álcool instaladas no país (Brasil, 1978; Brasil, 1980), porém a vinhaça ao ser diluída em água pode ser utilizada na agricultura irrigada, otimizando os recursos hídricos e insumos agrícolas.

Na busca mundial por fontes de energia renováveis e alternativas que permitam melhor aproveitamento dos recursos existentes, a biomassa se torna uma importante opção para geração de energia. A cana-de-açúcar moída na safra 2020 pela usina Agrovale apresentou em sua constituição 15,52% de fibra. A partir do incremento de produção em TC pela AP, é possível gerar 55,01 toneladas de bagaço, o qual pode ser utilizado, dentre várias aplicações, como fonte de energia.

Segundo Oliveira et al. (2018) para cada tonelada de bagaço de cana é possível gerar 376 kw de energia. Sendo assim, com o bagaço de cana gerado pelo benefício da AP é possível produzir 20,68 Mw de energia. Segundo Díaz Perez et al. (2018), no Brasil a geração de energia a partir da biomassa representa uma parcela substancial da capacidade instalada na Matriz de Energia Elétrica, representando 8,8% do total. Destaca-se que o bagaço de cana-de-açúcar desempenha um papel dominante nesse contexto, contribuindo com o montante de 77% dessa fonte energética.

O ganho de produção pela AP, não apenas contribui para a sustentabilidade a partir do aumento de energia gerada pela biomassa, mas também oferece benefícios financeiros substanciais para as usinas de

açúcar e álcool. Em um cenário de oscilação nos preços do etanol e da queda no valor do açúcar nos mercados internacionais, a diversificação das fontes de receita é fundamental para a estabilidade financeira das usinas (Cervi et al., 2019; Santos, 2020; Souto et al., 2018;)

A cultura da cana-de-açúcar permite que outros ODS possam ser avaliados numa pesquisa mais ampla. Diversos deles estão intimamente ligados à área de estudo sendo importante mencioná-los para futuras pesquisas, a exemplo do ODS1 (erradicação da pobreza) que é atendido pelo uso da terra com melhor aproveitamento, geração de empregos e produção de alimentos pelo setor sucroalcooleiro, permitindo um papel relevante na segurança alimentar.

A utilização do sistema de irrigação no campo São Jorge é uma forma de aumentar a eficiência do uso da água e eliminar despejos a partir de práticas conservacionistas, sendo metas do ODS6 (água potável e saneamento). O ODS8 (trabalho decente e crescimento econômico) é evidenciado no método de substituição da colheita manual pela mecanizada, promovendo emprego pleno e trabalho decente, assim como o crescimento da produção de etanol no Brasil impulsionado pelo Programa Nacional do Álcool (Proálcool) em 1975, aumentando o PIB e geração de emprego no país (Vaccaro et al., 2018).

O ODS15 (vida terrestre) também pode ser estudado em futuras pesquisas, uma vez que a expansão do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil permitiu substituir pastagens degradadas por um sistema de plantio sustentável, combatendo a desertificação de áreas, obedecendo ao zoneamento agroecológico do país, bem como conservando as florestas, protegendo as Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Reservas Legais (RLs), a partir das diretrizes do Cadastro Ambiental Rural (CAR).

Conclusões

Esse estudo se propôs a comparar dois anos (2019 e 2020) de colheita mecanizada da cana-de-açúcar, sem e com a utilização do piloto automático e do projeto georreferenciado, evidenciando os benefícios do uso de tecnologias na agricultura. Considerou-se nesta pesquisa a contribuição do VANT

como mais uma alternativa das geotecnologias para mapeamento de áreas e restituição de linhas de plantio em conjunto com o GNSS, processamento digital de imagem e elaboração de projetos de colheita.

Notou-se uma melhora no corte mecanizado da cana-de-açúcar com a adoção das tecnologias, refletindo na redução de perdas de matéria-prima. No primeiro ano (2019), em que não foi adotada a tecnologia de piloto automático e projeto georreferenciado, as perdas de matéria-prima durante a colheita mecanizada foram consideravelmente maiores, em relação ao ano seguinte analisado, esse fato está associado à dependência da habilidade dos operadores sob as máquinas e às limitações na precisão do corte, uma vez que as colhedoras eram operadas manualmente, tornando difícil manter um corte uniforme e evitar a quebra excessiva de cana, resultando em perdas classificadas como altas.

No entanto, no segundo ano (2020) houve uma mudança na metodologia do processo de colheita. A introdução do piloto automático associado ao projeto georreferenciado permitiu o corte mais preciso e eficiente da cana-de-açúcar. O piloto automático garantiu que as colhedoras seguissem trajetórias predefinidas com alta precisão a partir do projeto georreferenciado, evitando pisoteios, arranquio de soqueira e lacunas, fornecendo informações em tempo real sobre a localização e a qualidade da cana.

Apesar do mapeamento das linhas de plantio apresentar reduções de perdas na colheita mecanizada da cana-de-açúcar, os valores obtidos encontram-se fora do padrão de qualidade classificado como baixo para essa atividade, observados sob controle estatístico. Fatores como idade do canavial, variedade e condições do terreno podem interferir na qualidade da colheita mecanizada. Além disso, a sistematização do terreno com nivelamento do solo, formato dos talhões e comprimentos das linhas contribuirão para o desempenho da colheita mecanizada.

A redução do percentual de perdas de matéria-prima de cana-de-açúcar com a adoção do mapeamento das linhas de plantio, a partir do uso do VANT, é significativa, correspondendo a 47,61%. Dessa forma, a colheita mecanizada torna-se mais eficiente, aumentando o volume dos produtos e subprodutos da cana.

Além da redução de perdas, o projeto de colheita mecanizada georreferenciado proporcionará o tráfego controlado de máquinas sob a lavoura, direcionando a compactação do solo para a entrelinha de cana, com isso minimizando o pisoteio da soqueira, melhorando a absorção de água e nutrientes pela cultura, permitindo condições agrônômicas favoráveis a rebrota da cana-de-açúcar. Assim, espera-se que o canavial mantenha as produtividades sem quedas abruptas de rendimento a cada safra, com isso as reformas da lavoura passarão a ocorrer em maior espaço de tempo, reduzindo a necessidade de

operações como preparo de solo e plantio a fim retomar a produtividade da área aos padrões esperados pela empresa.

A cana-de-açúcar é caracterizada pela sua capacidade de gerar uma ampla gama de produtos, em que pequenas melhorias podem resultar impactos substanciais, seguindo uma relação inversamente proporcional. Os ganhos gerados pela AP levantados por essa pesquisa, promovem uma melhoria gradual e significativa na qualidade da terra, do solo, da água e do ar, uma vez que essa cultura possui autossuficiência, permitindo que as usinas aproveitem de maneira eficaz os rejeitos e os excedentes de sua cadeia produtiva. Isso significa que nada é desperdiçado, e os subprodutos são reaproveitados de maneira inteligente. Essa abordagem não apenas aumenta a eficiência da operação de colheita mecanizada, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental, reduzindo o impacto negativo no meio ambiente.

A aplicação bem-sucedida do piloto automático e do projeto georreferenciado na colheita mecanizada da cana-de-açúcar demonstra como a tecnologia pode desempenhar um papel transformador na agricultura, promovendo a sustentabilidade, a eficiência e o alinhamento com os princípios dos ODS. Além disso, essas melhorias beneficiam as empresas do setor, e também geram impactos positivos na economia, no meio ambiente e na sociedade como um todo, mostrando que a busca pela inovação tecnológica e pela responsabilidade ambiental podem ser aliadas na promoção da agricultura moderna.

Algumas críticas e pontos de melhoria podem ser mencionados, visando futuros trabalhos. É necessário replicar o estudo em usinas localizadas em outras regiões produtoras de cana-de-açúcar, com diferentes condições geográficas e climáticas, para validar os benefícios da AP. Quanto à sustentabilidade, embora a AP possa ajudar a reduzir danos à plantação e otimizar as operações de colheita, ainda existem preocupações ambientais, como a compactação do solo e o consumo de recursos naturais, que precisam ser abordadas de forma abrangente. Problemas sociais gerados pela substituição da mão de obra humana por máquinas podem levar à perda de empregos no setor agrícola, especialmente em áreas rurais onde a agricultura é uma fonte importante de sustento e isso precisa ser considerado ao avaliar os benefícios do uso da AP na colheita da cana-de-açúcar. Também é interessante uma análise de viabilidade econômica mais aprofundada, com os custos associados à implementação da AP, incluindo investimentos iniciais, custos operacionais e de manutenção.

Novos trabalhos poderão ser desenvolvidos, visando avaliar as perdas de matéria-prima em diferentes cenários: velocidade de operação, nivelamento do solo, porte do canavial, estado de manutenção das colhedoras e capacitação dos operadores.

Agradecimentos

Ao financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) –Brasil, Código de Financiamento 001. Ao financiamento do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA), da Universidade de Pernambuco e da Embrapa Semiárido.

Referências

- ABNT. (2004). NBR 10004. Classificação dos Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro.
- Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M.; Sparovek, G.; 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 6, 711-728. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>. Acesso: 11 fev. 2022.
- Alves, R. S.; Escarela, V. A. da C.; Santos, P. R. A.; Barboza, T. O. C.; Chioderoli, C. A. Controle estatístico de qualidade aplicado à quantificação das perdas na colheita mecanizada de cana-de-açúcar em função da rotação do extrator primário. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 16, p. e562111638611–e562111638611, 17 dez. 2022. Disponível: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i16.386111>. Acesso: 24 set. 2023.
- Aquino, G. S.; Santos, J. G. S.; Diniz, T. G.; Medina, C. De C.; Rosseto, R.; Moreira, A. Desenvolvimento de mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de torta de filtro e modos de aplicação. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 39, n. 5, p. 1899–1908, 20 ago. 2018. Disponível: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2018v39n5p1899>. Acesso: 3 dez. 2022.
- Barreto, M. J.; Junior, A. T. As transformações do trabalho na produção da cana-de-açúcar: a realidade entre o visível e o invisível. *Geosul*, v. 35, n. 76, p. 471–496, 27 out. 2020. Disponível: <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2020v35n76p471>. Acesso: set. 2022.
- Bassoi, L. H.; Inamasu, R. Y.; de Campos Bernardi, A. C.; Vaz, C. M. P.; Speranza, E. A.; Cruvinel, P. E. (2019). Agricultura de precisão e agricultura digital. In: *TECCOGS – Revista Digital de Tecnologias Cognitivas*, p. 17-36. Disponível: <https://doi.org/10.23925/19843585.2019i20p17-36>. Acesso: 10 jul. 2022.
- Batista, C. R.; Mendonça, I. D. N. Avaliação da mecanização sobre o mercado de trabalho na lavoura da cana-de-açúcar. *Revista de Economia Regional, Urbana e do Trabalho*, v. 8, n. 2, p. 50–86, 7 jun. 2020. Disponível: <https://doi.org/10.21680/2316-5235.2019v8n2>. Acesso: 5 jan. 2022.
- Benedini, M. S.; Brod, F. P. R.; Perticarrari, J. G. (2009). Perdas e impurezas vegetais e minerais na colheita mecanizada. *Boletim Técnico*, Guariba 1, p. 1-7.
- BRASIL. Portaria 323, de 29 de novembro de 1978. Brasília: [1978]. Disponível: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=91656>. Acesso: 01 out. 2023.
- BRASIL. Portaria 158, de 03 de novembro de 1980. Brasília: [1980]. Disponível: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=91653>. Acesso: 01 out. 2023.
- Cavalcante, W. S. da S., da Silva, N. F., Teixeira, M. B., Neto, G. Z., Filho, F. R. C., Cunha, F. N., & Corrêa, F. R. (2022). Tecnologias e inovações no uso de drones na agricultura / Technologies and innovations in the use of drones in agriculture. *Brazilian Journal of Development*, 8(1), 7108–7117. Disponível: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n1-481>. Acesso: 15 nov. 2022.
- Cepea/Esalq Pernambuco (2022). Mercado interno Indicador Mensal do Açúcar. Disponível: <https://www.cepea.esalq.usp.br/indicador/acucar-pernambuco-mercadointern.o.aspx>. Acesso em: 05 set. 2022.
- Cepea/Esalq Pernambuco (2022). Indicador Mensal do Etanol Hidratado Combustível. Disponível: <https://www.cepea.esalq.usp.br/indicador/etanol-mensal-pe.aspx>. Acesso em: 05 set. 2022.
- Cervi, W. R.; Lamparelli, R. A. C.; Seabra, J. E. A.; Junginger, M.; Hilst, F. Bioelectricity potential from ecologically available sugarcane straw in Brazil: A spatially explicit assessment. *Biomass and Bioenergy*, Oxford, v. 122, p. 391-399, 2019. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.001>. Acesso: 11 fev. 2023.
- Colhedora de Cana CH670. Disponível em: <<https://www.deere.com.br/pt/colheitadeiras/colhedora-de-cana/ch670/>>. Acesso em 01 set. 2022.
- Companhia Nacional de Abastecimento. (2022). Acompanhamento da safra brasileira de cana, v. 8 - Safra 2021/22, n. 4 Quarto levantamento, Brasília, p. 1-60.
- Da Silva, J. H. B.; do Nascimento, M. A.; da Silva, A. V.; Neto, F. P.; Araújo, J. R. E. S.; da Silva, J. M.; da Silva, A. J.; Mielezski, F. (2021). Brotação inicial, teor de sólidos solúveis e índice de maturação da cana-de-açúcar submetida à adubação com torta de filtro enriquecida / Initial breasting, soluble solids content and sugar cane maturation index submitted to fertilization with enriched filter pie. *Brazilian Journal of Development*, 7(3), 32575–32592. Disponível: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-805>. Acesso: 7 de out.

- 2022.
- Díaz Perez, A. A.; Escobar Palacio, J. C.; Venturini, O. J.; Martínez Reyes, A. M.; Rúa Orozco, D. J.; Silva Lora, E. E.; Almazan Del Olmo, O. A. Thermodynamic and economic evaluation of reheat and regeneration alternatives in cogeneration systems of the Brazilian sugarcane and alcohol sector. *Energy*, Oxford, v.152, p. 247-262, 2018. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.106>. Acesso: 19 jul. 2023
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2022). Adubação - resíduos alternativos. Disponível: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/correcao-e-adubacao/diagnose-das-necessidades-nutricionais/recomendacao-de-correcao-e-adubacao/adubacao-residuos-alternativos#:~:text=Figura%207.->. Acesso: 28 set. 2023.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2018). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. (5ª ed). Brasília: Embrapa, p. 355.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2019). Uso de Veículo Aéreo não Tripulado (Vant) como plataforma para monitoramento da produção agropecuária: estudo de caso para o milho forrageiro. 1 ed. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, p. 22.
- Freeland, R.; Allred, B.; Eash, N.; Martinez, L.; Wishart, D. (2019). Agricultural drainage tile surveying using an unmanned aerial system with real-time kinematic positioning: A case study. *Computers and electronics in agriculture* 165, p. 104-946. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.10496>. Acesso: 14 jul. 2022.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em 23 set. 2023.
- Lançoni, A. A.; Martinelli Soares, W.; Da Costa Carrer, C.; Gonçalves Lima, C. Efeito da Aplicação de um Sistema de Automação Agrícola em Colheita Mecanizada de Cana-de-Açúcar como Ferramenta de Gestão e Controle de Custo Operacional. *Ensaio e Ciência C Biológicas Agrárias e da Saúde*, [S. l.], v. 24, n. 2, p. 146–152, 2020. Disponível: <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2020v24n2p146-152>. Acesso: 16 set. 2023.
- López-Granados, F., Torres-Sánchez, J., Jiménez-Brenes, F. M.; Oñeka, O.; Marín, D.; Loidi, M.; Santesteban, L. G. (2020). Monitoring vineyard canopy management operations using UAV-acquired photogrammetric point clouds. *Remote Sensing*, 12 (14), 2331. Disponível: <https://doi.org/10.3390/rs12142331>. Acesso: 15 jul. 2022.
- Maes, W. H.; Steppe, K. (2019). Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Trends in plant science*, 24(2), 152-164. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007>. Acesso: 3 jun. 2023.
- Marafon, A. C.; Salomon, K. R.; Amorim, E. L. C.; Peiter, F. S. (2020). Use of sugarcane vinasse to biogas, bioenergy, and biofertilizer production. In *Sugarcane biorefinery, technology and perspectives* (pp. 179-194). Academic Press. Disponível: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814236-3.00010-X>. Acesso: 18 nov. 2022.
- Martins, A. L.; Wanke, P.; Chen, Z.; Zhang, N. (2018). Ethanol production in Brazil: An assessment of main drivers with MCMC generalized linear mixed models. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 16-27. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.016>. Acesso: 16 fev. 2022.
- Mazzi, J. V. C.; Santos, J. A. Dos; Montebello, A. E. S. Agricultura de precisão no Setor Sucroalcooleiro do estado de São Paulo: análise produtiva, econômica e ambiental. *Revista de Gestão e Secretariado (Management and Administrative Professional Review)*, v. 14, n. 5, p. 8556–8571, 30 maio 2023. Disponível: <http://doi.org/10.7769/gesec.v14i5.2227>. Acesso jun. 2023.
- Meert, L.; Aragão, G. N.; Genú, A. M.; Muller, M. M. L.; Espínola, J. De S.; Krenski, A.; Figueiredo, A. S. T. Perdas quantitativas e qualitativas de cana-de-açúcar em função de métodos de colheita e cultivares. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 11, p. e61991110204, 28 nov. 2020. Disponível: <http://dx.doi.org/10.33448/rsdv9i11.10204>. Acesso: 11 fev. 2022
- Mialichi Júnior, A. J.; Alves, A. B.; Bazela, C.; Faria, F. A. Torta de filtro e micronutrientes no plantio de cana-de-açúcar. *Ciência & Tecnologia*, v. 12, n. 1, p. 110–124, 4 abr. 2021. Disponível: <https://doi.org/10.52138/citec.v12i1.167>. Acesso: 7 jul. 2023
- Moreira, T. B. R.; Ferrari, J. L.; Rangel, O. J. P.; Dos Santos, A. Rosa. Obtenção do índice de vegetação de um mosaico utilizando o Agisoft Metashape: Passo a passo. 1 set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.36524/9788582635889>. Acesso: 29 jul. 2023.
- Neto, D. E. S. (2008). Variedades de cana-de-açúcar no Estado de Pernambuco contribuição do melhoramento Clássico da Ridesa–UFRPE. *Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica*, 5, 125-146. Disponível: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/apca/article/view/196>. Acesso: 14 nov. 2020

- 2022.
- Nicchio, B.; Santos, G. A.; Lino, A. C. M.; Ramos, L. A.; Pereira, H. S.; Korndörfer, G. H. Efeito da adubação foliar em soqueira de cana-de-açúcar. *Acta Iguazu*, v. 9, n. 2, p. 10–24, 24 jul. 2020. Disponível: <https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v9i2.2304>. Acesso em: 11 nov. 2022.
- Noetzold, R.; Alves, De C. M.; Júnior, M. M. G.; Goussain, R. C. S. (2019). Variabilidade espacial da eficiência do uso de potássio e fósforo na cultura da soja. *Engenharia na Agricultura*, 27(6). Disponível: <https://doi.org/10.13083/reveng.v27i6.931>. Acesso: 19 jan. 2022.
- Oliveira, A. P. M.; Fuganholi, N. S.; de Souza Cunha, P. H.; Barelli, V. A.; Bunel, M. P. M.; Novazzi, L. F. (2018). Análise técnica econômica de fontes de energia renováveis. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 4(1), 0163-0169. Disponível: <https://doi.org/10.18540/jcecvl4iss1pp0163-0169>. Acesso: 12 fev. 2022.
- Ouattara, I.; Hyyti, H.; Visala, A. (2020). Drone based Mapping and Identification of Young Spruce Stand for Semiautonomous Cleaning. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 15777- 15783. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.205>. Acesso: 11 fev. 2022.
- Pelloso, M. F.; Lima, A. A.; Pelloso, B. F.; Silva, A. P. Perdas na colheita mecanizada da cana-de-açúcar em resposta a diferentes velocidades da colhedora e de rotação do extrator primário. *Colloquium Agrariae*. ISSN: 1809-8215, v. 15, n. 2, p. 114–120, 24 abr. 2019. Disponível: <https://doi.org/10.5747/ca.2019.v15.n1.a290>. Acesso: 14 jul. 2023.
- Pelosi, E. M.; Shikida, P. F. A. A Dinâmica do Mercado de Trabalho Formal do Setor Sucroalcooleiro Paranaense de 2000-2017: Evolução dos Empregos e Perfil dos Trabalhadores. *Desenvolvimento em Questão*, v. 18, n. 53, p. 386–407, 6 nov. 2020. Disponível: <https://doi.org/10.21527/2237-6453.2020.53.386-407>. Acesso: 16 set. 2023.
- RCore Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 07 de Fev. 2022.
- Rallo, P.; De Castro, A. I.; López-Granados, F.; Morales-Sillero, A.; Torres-Sánchez, J.; Jiménez, M. R.; Jiménez-Brenes, F. M.; Casanova, L.; Suárez, M. P. (2020). Exploring UAV-imagery to support genotype selection in olive breeding programs. *Scientia Horticulturae*, 273, 109615. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109615>. Acesso: 12 ago. 2022.
- Reips, L.; Gubert, L. C. Drones como ferramenta de apoio para agricultores do Rio Grande do Sul. *Revista UFG*, v. 19, 22 ago. 2019. Disponível: <https://doi.org/10.5216/revufg.v19.58528>. Acesso: 19 set. 2023.
- Reis, G. N.; Voltarelli, M. A.; Da Silva, R. P.; de Toledo, A.; Lopes, A. (2015). Qualidade do corte basal na colheita mecanizada de cana-de-açúcar em dois tipos de manejo do solo. *Comunicata Scientiae*, 6(2), 143-153. Disponível: <https://doi.org/10.14295/cs.v6i2.784>. Acesso: 14 set. 2022.
- Rodrigues, J. Dos S.; Silva, P. C.; Rodolfo, A.; Gomes, L. F. Produtividade da cana-de-açúcar com aplicação de água residuária da indústria sucroenergética. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 5, p. e162953167, 2 abr. 2020. Disponível: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i5.3167>. Acesso: 2 ju. 2022.
- Santiago e Cintra. Sobre o Trimble R8s. Disponível: <https://santiagoecintra.com.br/produtos/receptor-trimble-r8s-tk/#:~:text=O%20Trimble%20R8s%20inclui%20dois,compacta%C3%A7%C3%A3o%20de%20corre%C3%A7%C3%A3o%20sem%20precedentes>. Acesso: 20 nov. 2021.
- Santos, J. R.; Miranda, A. T. de O. , Cardoso, D. D., Santos, B. T., Amaro, H. T. R., Porto, E. M. V. Perdas na colheita mecanizada da cana-de-açúcar em função da velocidade de trabalho da colhedora. *Pesquisa Agropecuária Pernambucana*, v. 24, n. 2, 2019. Disponível: <https://doi.org/10.12661/pap.2019.009>. Acesso: 20 set. 2023.
- Santos, P. S. B.; Ramos, R. A. V. Increased energy cogeneration in the sugar-energy sector with the use of sugarcane straw, electrification of drives, and high-drainage rollers in the extraction. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v. 40, n. 2, p. 249-257, 2020. Disponível: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n2p249-257/2020>. Acesso: 7 jun. 2023.
- Senar. Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. (2018) Agricultura de precisão: operação de drones. Brasília. p. 7. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/assets/arquivos/249-DRONES.pdf>. Acesso em 20 de out. 2021
- Silva, G. S. P. L.; da Silva, F. C.; Alves, B. J. R.; Tomaz, E.; Berton, R. S.; Marchiori, L. F. S.; Da Silveira, F. G. (2019). Efeitos da aplicação de vinhaça" in natura" ou concentrada associado ao N-fertilizante em soqueira de cana-de-açúcar e no ambiente. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/holos.v19i1.12212>. Acesso em: 27 de set. 2022.
- Silva, L. S.; Zanoni, V. A. G.; Pazos, V. C.; dos Santos,

- L. M. A.; Jucá, T. R. P. Fotogrametria com imagens adquiridas com drones: do plano de voo ao modelo 3D. Brasília, DF: LaSUS FAU: Editora Universidade de Brasília, 2022. 78 p. Disponível: <https://doi.org/10.29327/563260>. Acesso: 21 jul. 2023.
- Souto, T.; Coelho, A.; Holanda, R.; Moraes, A.; Paz, Y.; Da Silva, R. Viabilidade da bioeletricidade a partir da cana-de-açúcar. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, Maringá, v. 11, n. 2, p. 409-429, 2018. Disponível: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2018v11n2p409-429>. Acesso: 23 set. 2022.
- Torres-Sánchez, J.; de Castro, A. I.; Pena, J. M.; Jiménez-Brenes, F. M.; Arquero, O.; Lovera, M.; López-Granados, F. (2018). Mapping the 3D structure John Deere of almond trees using UAV acquired photogrammetric point clouds and object-based image analysis. *Biosystems engineering*, 176, 172-184. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.018>. Acesso: 11 fev. 2022.
- Vaccaro, G. L. R.; Longhi, A.; Moutinho, M. H. C.; Scavarda, A.; Lopes, C. M.; dos Reis, A. N.; Nunes, F.; Azevedo, D. (2018). Interrelationship among actors in ethanol production chain as a competitive and sustainable factor: The case of associative production and family-farming in southern Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 196, 12391255. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.036>. Acesso: 13 ago. 2022
- Vasconcellos, T. C. D.; Marins, F. A. S.; Muniz Junior, J. (2008). Implantação do método activity based costing na logística interna de uma empresa química. *Gestão & Produção*, 15, 323-335. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0104530X2008000200009>. Acesso: 11 jan. 2023.
- Wilkie, A. C.; Riedesel, K. J.; Owens, J. M. Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks. *Biomass and Bioenergy*, v. 19, n. 2, p. 63–102, ago. 2000. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00017-9](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00017-9). Acesso: 19 jul. 2022.