

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FALHAS EM CANA-DE-AÇÚCAR: UMA OPORTUNIDADE
PARA O MANEJO LOCAL DE FERTILIZANTES**

Rafael De Graaf Corrêa
Mestre em Agronomia

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**FALHAS EM CANA-DE-AÇÚCAR: UMA OPORTUNIDADE
PARA O MANEJO LOCAL DE FERTILIZANTES**

Rafael De Graaf Corrêa
Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani
Prof. Dr. Cristiano Zerbato

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo)

C824f

Corrêa, Rafael de Graaf

Falhas em cana-de-açúcar: uma oportunidade para o manejo local de fertilizantes. / Rafael De Graaf Corrêa. -- Jaboticabal, 2022

x, 63 p. : il., tabs

Tese (doutorado) -- Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Carlos Eduardo Angeli Furlani

Coorientador: Cristiano Zerbato

1. Agricultura de precisão. 2. Corte automático de seções. 3. Nitrogênio. 4. Potássio. 5. Sustentabilidade. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

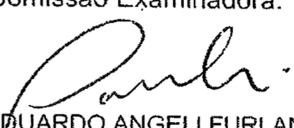
TÍTULO DA TESE: FALHAS EM CANA-DE-AÇÚCAR: UMA OPORTUNIDADE PARA O MANEJO LOCAL DE FERTILIZANTES

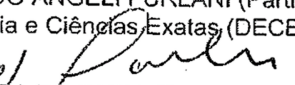
AUTOR: RAFAEL DE GRAAF CORREA

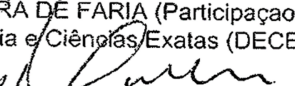
ORIENTADOR: CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI

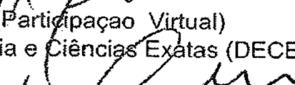
COORIENTADOR: CRISTIANO ZERBATO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas (DECEX) / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas (DECEX) / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. AFONSO LOPES (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas (DECEX) / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. RAFAEL HENRIQUE DE FREITAS NORONHA (Participação Virtual)
CFCTA/UFSP / Itabuna/BA


Prof. Dr. ANTONIO TÁSSIO SANTANA ORMOND (Participação Virtual)
Universidade do Estado de Minas Gerais - UEMG / Passos/MG

Jaboticabal, 16 de novembro de 2021

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

RAFAEL DE GRAAF CORRÊA – nascido em 18 de agosto de 1995, no município de Tupã, no interior do estado de São Paulo, filho de Patrícia Sofia de Graaf e Fábio Roberto de Sousa Corrêa. Possui formação em Técnico em Informática para Internet (2012) pela ETEC Prof. Massuyuki Kawano, Centro Paula Souza. Em 2013 ingressou no curso de Tecnologia em Mecanização em Agricultura de Precisão, na FATEC Shunji Nishimura, localizada no município de Pompéia no interior de São Paulo. Entre os anos de 2014 e 2015 foi estagiário e bolsista pela FUNDAP (Fundação do Desenvolvimento Administrativo) atuando na Fazenda de Ensino da Fundação Shunji Nishimura de Tecnologia. Graduiu-se Tecnólogo em Mecanização em Agricultura de Precisão em fevereiro de 2016. Em agosto de 2016 iniciou o curso de Mestrado no Programa de Agronomia (Ciência do Solo), com bolsa da CAPES, na Faculdade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Jaboticabal sob orientação do Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani e co-orientação do Prof. Dr. Cristiano Zerbato. Defendeu a Dissertação “Direções de semeadura, densidade de plantas e variações na dosagem de sementes na produtividade do milho”, obtendo o título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo) em fevereiro de 2018. Em março de 2018 ingressou no curso de Doutorado Programa de Agronomia (Ciência do Solo), também com bolsa da CAPES, na Faculdade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Jaboticabal sob mesma orientação. Desenvolveu pesquisas a respeito dos impactos das falhas de rebrota em cana-de-açúcar e sobre a possibilidade de interrupção da aplicação de fertilizantes em cobertura sobre as falhas. Obtendo o título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo) no dia 16 de novembro de 2021.

"Se você tem um grande problema, isso quer dizer apenas que está sendo uma pessoa pequena." T. Harv Eker.

Aos meus Pais, Fábio Roberto de Sousa Corrêa e Patrícia Sofia De Graaf, pela dedicação, educação e esforços dedicados a mim. Às minha irmãs, Agatha de Graaf Corrêa e Letícia de Graaf Corrêa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por iluminar meu caminho e permitir alcançar meus objetivos.

Aos meus pais Fábio Roberto de Souza Corrêa e Patrícia Sofia de Graaf pela confiança, pelo incentivo, e por me proporcionar a oportunidade de aprimorar meus conhecimentos e minha formação. A minhas irmãs Agatha De Graaf Corrêa e Leticia De Graaf Corrêa.

A Andressa Tellechea Rodrigues, pelo apoio e companheirismo durante essa etapa da minha vida.

Aos amigos que fiz ao longo da minha jornada, especialmente aos meus companheiros da República Xicreti, que possuem uma parcela de participação nesse trabalho.

À Unesp, e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo), pela oportunidade de crescimento que proporcionada.

Aos meus amigos, mentores e orientadores Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani e Prof. Dr. Cristiano Zerbato, pela orientação, pelo voto de confiança e por todas as oportunidades por vocês proporcionadas, que deram um norte a minha vida profissional.

Ao Marcelo Barbosa Junior pela ajuda na execução dos experimentos e ao Danilo Tedesco pelo auxílio na redação científica.

Aos inúmeros membros que passaram pelo Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola (LAMMA) e que nos últimos 5 anos estiveram presentes e compartilharam momentos e experiências, apoio e esforço para execução desse e de outros projetos.

Ao Grupo Ipiranga Agroindustrial, que nos confiou áreas para instalação dos experimentos.

Aos membros da banca de qualificação e defesa, pelas considerações que enriqueceram as discussões e validaram a presente tese.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A todos.

SUMÁRIO

	Página
1 Considerações gerais	1
1.1 Introdução	1
1.2 Revisão bibliográfica	2
1.2.1 Cana-de-açúcar	2
1.2.2 Produtividade e longevidade do canavial	3
1.2.3 Falhas de cana-de-açúcar	5
1.2.4 Efeito compensatório de produtividade em cana-de-açúcar	7
1.2.5 Uso de fertilizantes em cana-de-açúcar	9
1.3 Estrutura da tese	13
1.4 Referências	14
2 Efeito compensatório de falhas em cana-de-açúcar e a relação entre perdas e o percentual de falhas	21
2.1 Resumo	21
2.2 Introdução	22
2.3 Material e Métodos	23
2.3.1 Métodos adotados na avaliação dos parâmetros de desempenho	25
2.3.1.1 Contagem de perfilho	25
2.3.1.2 Altura de plantas	25
2.3.1.3 Diâmetro e massa de colmos	26
2.3.1.4 Parâmetros tecnológicos	26
2.3.2 Análise estatística	26
2.3.2.1 Relação entre decréscimo na produtividade e o percentual de falhas	26
2.4 Resultados	27
2.4.1 Parâmetros biométricos	28
2.4.2 Parâmetros tecnológicos	28
2.5 Discussão	29
2.5.1 Relação perdas-falhas	30
2.5.2 Redução de perdas na produção	33
2.6 Conclusões	35
2.7 Referências	36
3 É necessário aplicar fertilizantes sobre as falhas na cana-de-açúcar?	39
3.1 Resumo	39
3.2 Introdução	40

3.3	Material e Métodos	42
3.3.1	Área experimental	42
3.3.2	Delineamento experimental	43
3.3.3	Instalação do experimento	44
3.3.4	Avaliações	45
3.3.4.1	Avaliação 1 (30 dias após a colheita)	45
3.3.4.2	Avaliação 2 e 3 (60 e 90 dias após a colheita)	46
3.3.4.3	Avaliação 4 (180 dias após a colheita)	46
3.3.4.4	Avaliação 5 (Colheita)	46
3.3.5	Parâmetros tecnológicos	47
3.3.6	Metodologia adotada na caracterização das falhas dos canaviais	47
3.3.7	Análises realizadas	48
3.3.7.1	Análise estatística	48
3.3.7.2	Análise econômica	48
3.4	Resultados	49
3.4.1	Falhas de 0,5 m	49
3.4.2	Falhas de 1,0 m	50
3.4.3	Falhas de 1,5 m	51
3.4.4	Falhas de 2,0 m	52
3.4.5	Falhas de 2,5 m	53
3.5	Discussão	54
3.5.1	Desempenho agrônomo	54
3.5.2	Ocorrência de falhas	56
3.5.3	Custo dos fertilizantes aplicados sobre as falhas	57
3.6	Conclusões	59
3.7	Referências	60
4	Considerações finais	63

FALHAS EM CANA-DE-AÇÚCAR: UMA OPORTUNIDADE PARA O MANEJO LOCAL DE FERTILIZANTES

RESUMO – Para a cultura da cana-de-açúcar algumas questões ainda não foram claramente respondidas na literatura: (i) no cenário atual do setor canavieiro, até qual comprimento de falha as plantas vizinhas à extremidade, emitem efeito compensatório sobre a produtividade; (ii) a interrupção do uso de insumos sobre o local com falha pode influenciar na produtividade das plantas localizadas na extremidade da falha. Com base nesse contexto, a presente tese teve por objetivo avaliar se plantas da cultivar de cana-de-açúcar RB86-7515, induz efeito compensatório da produtividade quando localizadas nas extremidades das falhas (Capítulo 2), e quais são os efeitos econômicos da interrupção da aplicação de fertilizantes sobre as áreas que apresentam falhas nas linhas de cana-de-açúcar (Capítulo 3). Para isso, dados de mapeamento de falhas em linhas de cana-de-açúcar com uso de imagens de drones foram adquiridos em lavouras comerciais com idades diferentes. Em cada canavial, foram avaliados parâmetros econômicos da lavoura. Uma área experimental foi implantada, onde se estudou a resposta produtiva das plantas aos espaços não preenchidos, e à aplicação de fertilizantes nesses espaços. Os resultados indicaram que as plantas vizinhas à extremidade da falha compensam até o comprimento de 0,50 m, além disso, descobriu-se que a utilização de insumos sobre o local das falhas, não influencia a produção das plantas vizinhas. Contudo, essas informações combinadas ao mapeamento preciso de falhas na cana-de-açúcar são benéficas para a definição de estratégias para o gerenciamento de insumos, que além de favorecer a rentabilidade do cultivo, auxilia na redução dos impactos ambientais.

Palavras-chave: agricultura de precisão, corte automático de seções, nitrogênio, potássio, sustentabilidade

SUGARCANE GAPS: AN OPPORTUNITY FOR SITE-SPECIFIC FERTILIZER MANAGEMENT

ABSTRACT – As far as is known, for sugarcane crops some questions have not yet been clearly answered in the literature: (i) in the current sugarcane sector scenario, up to which skip length the plants next to the skip, can compensate the yield; (ii) the interruption of input application over the skip can influence the yield of plants located next to the skip. Based on this context, the present thesis was aimed to evaluate if plants of the sugarcane variety RB86-7515, widely deployed today, induce compensatory effect on yield when located next to the skips (Chapter 2), and what are the economic effects of interrupting fertilizer application over the skips (Chapter 3). To this end, sugarcane skips mapping data using drone imagery were acquired in commercial fields at different ages. In each field, economic parameters of the crop were evaluated. An experimental area was deployed, where the yield response of plants next to the skips, and the application of fertilizer over the skips was studied. The results indicated that the plants next to the skip can compensate up to a length of 0.50 m. In addition, it was found that the use of inputs over the skips, does not influence the yield of plants next to the skips. However, this information combined with the precise mapping of sugarcane skips is beneficial for defining strategies for the management of inputs, which in addition to favoring the profitability of the crop, assists in reducing environmental impacts.

Keywords: precision agriculture, automatic section control, nitrogen, potassium, sustainability.

LISTA DE TABELAS

	Página
1.1 Qualidade do plantio pelo método de determinação de falhas de Stolf. Fonte: Adaptado de (STOLF, 1986).	5
2.1 Características dos campos de produção de cada mapa de falha utilizado.	26
2.2 Análise temporal do número de perfilhos nas zonas amostrais. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si na linha , pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade	28
2.3 Perda média de produtividade dos canaviais sob diferentes percentuais e tamanhos médios de falhas.	34
2.4 Produtividade média dos canaviais brasileiro, de acordo com CONAB (2020), sob diferentes percentuais e tamanhos médios de falhas.	34
3.1 Áreas experimentais utilizadas no mapeamento de falhas em soqueiras em função da idade do canavial.	47
3.2 Custo de aplicação de fertilizantes e ocorrência de falhas com comprimento entre 0,5 m e 1,0 m, conforme SOCICANA (2019), ao longo de sete cortes.*Cotação média do dólar no período: R\$ 4,08.	49
3.3 Custo de aplicação de fertilizantes e ocorrência de falhas com comprimento entre 1,0 m e 1,5 m, conforme SOCICANA (2019), ao longo de sete cortes.*Cotação média do dólar no período: R\$ 4,08.	50
3.4 Custo de aplicação de fertilizantes e ocorrência de falhas com comprimento entre 1,5 m e 2,0 m, conforme SOCICANA (2019), ao longo de sete cortes.*Cotação média do dólar no período: R\$ 4,08.	51
3.5 Custo de aplicação de fertilizantes e ocorrência de falhas com comprimento entre 2,0 m e 2,5 m, conforme SOCICANA (2019), ao longo de sete cortes.*Cotação média do dólar no período: R\$ 4,08.	52
3.6 Custo de aplicação de fertilizantes e ocorrência de falhas com comprimento superior à 2,5 m, conforme SOCICANA (2019), ao longo de sete cortes.*Cotação média do dólar no período: R\$ 4,08.	53

LISTA DE FIGURAS

	Página
1.1 Dez países maiores produtores de cana-de-açúcar. A figura à direita representa o volume da produção e a figura da esquerda a área cultivada. . . .	2
1.2 Ilustração do efeito compensatório de produção em função da localização das plantas na extremidade das falhas nas linhas de cana-de-açúcar. . . .	8
1.3 Ilustração das fases de crescimento da cana-de-açúcar.	11
1.4 Ilustração do uso de fertilizante sob as áreas com falhas nas linhas de cana-de-açúcar.	12
2.1 Disposição das zonas amostrais perante as falhas.	24
2.2 Métodos de medição de altura nas fases de brotação e perfilhamento (a) e na fase de crescimento de colmos (b).	25
2.3 Produtividade das zonas amostrais comparadas entre si pelo teste de tukey à nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade. Em rosa, produtividade média caracterizada em trechos distantes de falha.	27
2.4 Relação entre percentual de redução na produção devido a falhas, e o percentual de falhas em soqueiras do 2º ao 7º corte.	31
2.5 Ocorrência das classes de comprimento de falhas nos mapas de falhas analisados.	33
3.1 Localização da área experimental.	42
3.2 Ilustração do uso de fertilizante sob as áreas com falhas nas linhas de cana-de-açúcar.	43
3.3 Disposição das zonas amostrais perante as falhas.	44
3.4 Métodos de medição de altura nas fases de brotação e perfilhamento (a) e na fase de crescimento de colmos (b).	45
3.5 Exemplo de demarcação de falhas na linha da cultura.	48
3.6 Distribuição das falhas em função da idade do canavial.	56
3.7 Frequência da ocorrência de falhas agrupadas por tamanho.	57
3.8 Custo com adubação de falhas no período do experimento em função da idade do canavial, segundo SOCICANA (2019), com dólar médio cotado em R\$ 4,08.	58

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1.1 Introdução

A cana-de-açúcar é importante para produção de biocombustíveis e alimentos, os quais são necessários para o desenvolvimento sustentável da agricultura. Entretanto, a produtividade da cultura está estabilizada e como a cultura é cultivada por anos, a produção diminui o que exige que uma nova lavoura seja implantada. Os custos envolvidos na implementação de uma nova lavoura são altos, além disso, existem impactos ambientais com o uso de insumos. Por essa razão, esforços para melhorar as condições de cultivo, de modo a garantir que a cultura mantenha uma produtividade satisfatória ao longo dos anos, com a finalidade de aumentar a longevidade do canavial, são necessários.

Com os avanços tecnológicos no setor canavieiro, é possível obter informações diárias sobre as condições do cultivo. Com uso de veículos aéreos não tripulados, por exemplo, é possível obter imagens para extrair as linhas da cultura e por meio do processamento destas imagens verificar se existem falhas no canavial. As falhas no canavial podem ser definidas pela ausência de plantas na linha de cultivo, quando a distância entre uma planta e outra for maior que 0,50 m.

Atualmente, essas informações têm sido utilizadas para definir estratégias para replantio de mudas quando identificada tais condições nos primeiros anos de cultivo, e para renovação do canavial quando essas condições começam afetar a produtividade. A tomada de decisão por meio dessas informações traz grandes benefícios para o setor canavieiro, mas ainda existem pontos que podem ser melhorados. Pois, até onde sabe-se, ainda não está claro na literatura quais são os impactos dos comprimentos das falhas sobre a produtividade da cultura.

Acredita-se, portanto, que caso exista efeito compensatório da produtividade pelas plantas próximas às falhas, é possível determinar estratégias para o manejo local dos insumos, com a finalidade de otimizar o seu uso. No entanto, ainda não é conhecido qual o efeito da utilização desses insumos sobre as falhas na linha de cana-de-açúcar, se há desperdícios, e se os impactos que a utilização indiscriminada desses fertilizantes sobre as falhas podem ocasionar no desenvolvimento e produção da cultura. Com base nesse contexto, para entender esse fenômeno claramente, na presente tese a partir de um ensaio de campo, avaliou-se o efeito compensatório da produtividade de plantas localizadas na extremidade de falhas e os efeitos econômicos da interrupção da aplicação de fertilizantes sobre as áreas que apresentam falhas nas linhas de cana-de-açúcar.

1.2 Revisão bibliográfica

1.2.1 Cana-de-açúcar

A cana de açúcar (*Saccharum spp.*) é uma cultura semi-perene C4 de produção comercial pertencente à família Graminae da ordem Glumiflorae. Esta cultura é utilizada principalmente como matéria-prima para produção de etanol e açúcar. A cana-de-açúcar é cultivada comercialmente na maioria das regiões tropicais e subtropicais do globo. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar, responsável por cerca de 40% da produção mundial, com volume de produção de 768 milhões de toneladas por ano e área cultivada de 10.226.205 hectares (ATLASBIG, 2021). A frente de países como Índia e China que são responsáveis por aproximadamente 18% e 6%, respectivamente, da produção mundial. A Figura 1.1 apresenta a produção e área cultivada dos 10 países maiores produtores mundiais.

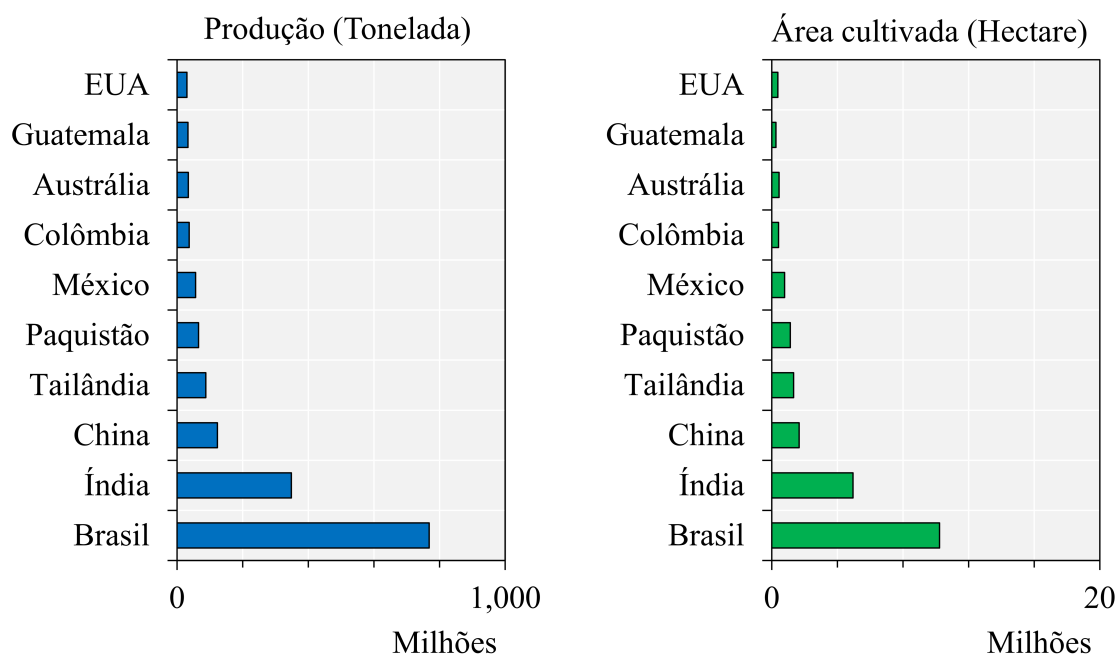


Figura 1.1: Dez países maiores produtores de cana-de-açúcar. A figura à direita representa o volume da produção e a figura da esquerda a área cultivada.

O Brasil é o maior produtor, principalmente pelas condições climáticas e de solo, as quais são favoráveis para o cultivo da cultura (TAYT'SOHN; NUNES; PEREIRA, 2018). A cultura desempenha papel essencial na economia do país. O Estado de São Paulo é o maior produtor, responsável por cerca de 52% da produção nacional cultivando uma área de aproximadamente 5,0 milhões de hectares, com volume de produção de 412,4 milhões de toneladas estimada para safra 2021/22 (CONAB, 2020).

A produção de cana-de-açúcar e as indústrias contribuem com 29,3% do PIB do Estado de São Paulo (IEA, 2021).

A cultura da cana-de-açúcar é um produto estratégico, principalmente pelo fato de que a partir desta cultura pode-se produzir combustíveis como etanol, que pode ser utilizado como alternativa aos combustíveis derivados do petróleo (GRANCO et al., 2018). Além disso, mais de 60% do açúcar produzido no mundo vem da cana-de-açúcar (NASERI et al., 2021).

A cultura da cana-de-açúcar também possui uma série de subprodutos que são utilizados em inúmeras aplicações durante o ciclo de produção e após o processo de colheita. Como exemplo de utilização durante o ciclo de produção tem-se a vinhaça, que é um volume de efluentes resultante do processo de produção de etanol, que pode ser utilizado para aplicação na lavoura com a finalidade de reciclar a água e nutrientes (DÍAZ et al., 2002), substituir fertilizantes químicos e aumentar de produtividade (CHRISTOFOLETTI et al., 2013). Para aplicação após o processo de colheita, os resíduos como palhada e bagaço da cana-de-açúcar podem ser utilizados para produção de bioeletricidade. Tal aplicação, reduz a dependência de países em relação a utilização de combustíveis fósseis para geração de eletricidade (AGUIAR et al., 2021; LAGO et al., 2012).

1.2.2 Produtividade e longevidade do canavial

A produção da cana-de-açúcar é caracterizada por interações entre elementos abióticos (tais como chuva, temperatura, umidade, etc.) e condições edáficas (MISHRA et al., 2021). A compreensão básica destas condições é necessária para a tomada de decisões sobre a previsão da produção. Devido a estas restrições, não é fácil analisar o desempenho e a produtividade.

A cana-de-açúcar é uma cultura semi-perene que pode ser conduzida por anos, dependendo da sua produtividade. Normalmente a produção do primeiro ano é maior, e conforme os anos vão se passando a tendência é que a produção diminua. Por essa razão, os produtores tomam a decisão de renovar o canavial e plantar uma nova safra. São inúmeros os fatores que podem levar a cultura reduzir sua produtividade e não garantir a longevidade do canavial. Portanto, é importante definir técnicas para melhorar a condução da cultura durante todos os anos de cultivo, pois, quanto mais tempo a cultura apresentar produtividade satisfatória, mais sustentável será o cultivo.

Dos fatores que reduzem a produtividade, cita-se principalmente o envelhecimento da planta, que causa a redução da capacidade fotossintética das lâminas foliares (HEERDEN et al., 2010). Além disso, técnicas de manejo adotadas durante o ciclo de produção podem influenciar na produtividade e longevidade do canavial (MOLIN; VEIGA, 2016). Como por exemplo, o uso intensivo de máquinas agrícolas como tratores e transbordos em cultivos não sistematizados, ou seja, sem o uso de direcionamento automático, esses podem atropelar as soqueiras e assim prejudicar a rebrota do canavial.

Além disso realizar a colheita mecanizada, em condições desfavoráveis com regulagens incorretas pode causar danos a soqueira, os quais também podem prejudicar o rebrote do canavial (SANTOS et al., 2013), pois esses danos facilitam o ataque de pragas e doenças. Os quais impactam diretamente na produtividade, reduzindo, portanto, a longevidade do canavial. É comum que nos espaços onde houve um pisoteio ou o ataque de praga o rebrote do canavial não ocorra em algumas soqueiras. Por essa razão, existirão espaços vazios entre as soqueiras.

Esses espaços vazios são chamados de “falhas”. Essas falhas, portanto, reduzem a produtividade e longevidade do canavial. Por essa série de fatores, a produtividade de cana-de-açúcar tem se estabilizado na última década, em cerca de 76,1 tonelada por hectare (CONAB, 2020), muito inferior comparada a produtividade obtida por produtores consolidados e do potencial de produção da cana-de-açúcar (MONTEIRO; SENTELHAS, 2014; SANCHES et al., 2021). Portanto, na próxima seção, serão abordados os detalhes e quais as lacunas para implantação de novos métodos para melhorar a produtividade e longevidade do canavial a partir do conhecimento da localização das falhas no canavial.

1.2.3 Falhas de cana-de-açúcar

Um dos primeiros estudos relatados para avaliar falhas em cana-de-açúcar determinaram falhas quando o espaçamento entre duas soqueiras é maior que 0,5 metros (STOLF, 1986). O estudo foi realizado para avaliar a qualidade do plantio, classificando em função da porcentagem de falhas do canavial e apresentar direções para tomada de decisão quanto a realização da reforma/replanteio do canavial. Um resumo das observações para tomada de decisão é apresentado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Qualidade do plantio pelo método de determinação de falhas de Stolf. Fonte: Adaptado de (STOLF, 1986).

Qualidade do Plantio	Porcentagem de Falha	Observação
Excelente	0 – 10	Condições excepcionais de brotação
Normal	10 – 20	Tipo mais comum observado
Regular	20 – 35	Possibilidade de renovação pode ser considerada
Ruim	35 – 50	Renovação pode ser considerada
Péssimo	50	Reformar/Replanta

Embora esse método apresente alta precisão para determinação das falhas do canavial, ele apresenta algumas desvantagens, principalmente em relação a forma de realizar a medição, pois embora seja manual e fácil, é necessário ir a campo e assim torna-se inviável sua utilização para avaliação de grandes áreas (MOLIN; VEIGA, 2016). Por essa razão, esse método vem sendo substituído pelo uso de sensores espectrais embarcados em máquinas/implementos ou por meio do imageamento dos canaviais com o uso de veículos aéreos não tripulados (VANTS).

Muitos estudos relataram o desenvolvimento de métodos alternativos à avaliação manual de campo. MOLIN e VEIGA (2016), desenvolveram um sistema baseado em um sensor fotoelétrico para inspecionar o canavial, georreferenciando as falhas e apresentando-as em um mapa. Para isso, um coletor de dados integrou um sensor fotoelétrico, um “encoder” um Sistema de Navegação Global por Satélites (GNSS) mensurando a distância entre as plantas, definindo as falhas. Embora o método facilite a medição das falhas em campo, o método apresenta algumas desvantagens, pois exige a circulação por todas as linhas de plantio do canavial (JÚNIOR, 2021), o que pode levar o aumento dos custos e do tempo para avaliação (LUNA; LOBO, 2016). Além disso, existe o risco de pisoteio das soqueiras caso essa inspeção não seja realizada com máquinas/veículos que possuem um sistema de direcionamento com correção em

tempo real ao nível centimétrico ($\pm 2,5$ cm).

Uma alternativa para solucionar o problema de avaliar as plantas em campo de maneira que seja fácil de realizar e representativo para representar o campo de produção é o uso de imagens aéreas adquiridas por VANTS. Esses equipamentos estão revolucionando os métodos para gerenciamento dos campos de produção, permitindo que o manejo específico seja realizado mais facilmente, pois permitem obter informações diariamente com um detalhamento do campo a nível centimétrico. Resultados promissores tem sido encontrados para avaliação do estado de plantas (OSCO et al., 2021; VONG et al., 2021), avaliação da maturação de amendoim (SANTOS et al., 2021), estimativa da produtividade de cultivos (FENG et al., 2020; TEDESCO et al., 2021; SCHWALBERT et al., 2020) e monitoramento do status da água de cultivos (PARK et al., 2020; POBLETE; ORTEGA-FARÍAS; RYU, 2018).

Recentemente, esses equipamentos alinhados com técnicas de processamento de imagens têm sido utilizados também na avaliação das falhas em cana-de-açúcar com a finalidade de definir métodos para gerenciamento sustentável do canavial (LUNA; LOBO, 2016; JÚNIOR, 2021; MALDANER et al., 2021; SOUZA et al., 2017). Para identificar as falhas nas imagens aéreas, LUNA e LOBO (2016) utilizaram um método de agrupamento para diferenciar as regiões das imagens com plantas e com solo. A classificação na imagem pode ocorrer por meio de uma análise discriminante linear (LENNON, 2002). Por fim, após essa classificação os resultados das áreas onde havia falhas nas imagens foram comparados com áreas com falhas no campo. Os resultados atingiram uma acurácia média de 23,5 cm. Também buscando desenvolver um método para identificar as falhas do canavial, (SOUZA et al., 2017) utilizaram uma abordagem baseada em objetos (OBIA). O procedimento consistiu em três fases consecutivas: (1) identificação das linhas de plantio de cana-de-açúcar, (2) identificação da cana-de-açúcar existente nas linhas de plantio e (3) extração das falhas e criação de mapas de cultura de linha do plantio. Os resultados para validação alcançaram uma acurácia média de 0,33 cm. Ambos os estudos apresentaram resultados importantes para avaliação das falhas em cana-de-açúcar e as lacunas existentes para melhorar a acurácia dos resultados de monitoramento de falhas.

A fim de comparar os resultados das metodologias para identificação das falhas tanto utilizando sensores de dossel embarcados em equipamentos quanto utilizando imagens adquiridas por UAVs (Unmanned Aerial Vehicle). MALDANER et al. (2021), compararam quatro técnicas para identificação e mediação das falhas nas linhas da cana-de-açúcar. Neste estudo os autores avaliaram, três técnicas baseadas em sensores embarcados em equipamentos (e.g., índice de vegetação, ultrassônico e fotoelétrico), comparando com o método mais atual que está sendo utilizado que é o

monitoramento por meio de imagens adquiridas por UAVs.

Todos os resultados daquele estudo apresentaram acurácia semelhante ou igual aos estudos mencionados anteriormente, exceto o monitoramento realizado pelo sensor fotoelétrico. O sensor fotoelétrico obteve o melhor desempenho na medição do comprimento das falhas (RMSE 0,18 m) com a menor variação do RMSE ao longo do estágio de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

De maneira geral, todos estudos de falhas mencionados deram uma direção para desenvolvimento de novos métodos para gerenciamento na cultura de cana-de-açúcar. O monitoramento das falhas permite que estratégias de manejo sejam adotadas em função da porcentagem das falhas da lavoura. Em primeiro lugar podemos realizar a reforma do canavial, realizando o replantio da lavoura. Embora essa seja uma decisão eficiente, ela gera custos o que pode inviabilizar a reforma caso o problema das falhas ocorra em muitos campos de produção. O ideal seria utilizar as informações do monitoramento de falhas, sejam elas adquiridas por meio de sensores embarcados em equipamentos ou por meio do processamento de imagens UAV, para definir métodos com a finalidade de aumentar a longevidade do canavial, verificando quais são os impactos dos comprimentos das falhas sob a produção, ou até mesmo, analisar o efeito do uso eficiente dos insumos de fertilizantes sob as falhas, os quais estão relacionados aos objetivos gerais desta Tese. Mas, antes é necessário compreender o efeito compensatório da produtividade da cana-de-açúcar e do uso de fertilizantes sob as falhas de cana-de-açúcar.

Portanto, nas próximas seções serão apresentados de acordo com a literatura existente quais são os efeitos do comprimento das falhas sob a produção e se é possível obter uma redução do uso de insumos de modo a manter a produtividade da cana-de-açúcar sem a adubação das áreas que apresentam falhas nas linhas de cana-de-açúcar.

1.2.4 Efeito compensatório de produtividade em cana-de-açúcar

Até aqui verificou-se que as falhas afetam a produção da cana-de-açúcar. Mas ao mesmo tempo abre os caminhos para o desenvolvimento de novos métodos para gerenciamento das lavouras de cana-de-açúcar com base nessa fonte de informação. Todos os estudos mencionados anteriormente se basearam na metodologia desenvolvida por (STOLF, 1986), para determinação da porcentagem das falhas na cana-de-açúcar. Pois, essa metodologia é consolidada e permitiu grandes avanços para o gerenciamento e tomada de decisão no setor canavieiro. O autor considerou falhas distâncias maiores que 0,50 m entre soqueiras. Em estudo mais recente, (STOLF, 1991), descobriu que por meio da determinação do percentual das falhas dos canaviais é possível deter-

minar também as perdas de produção, pois existe uma relação entre a quantidade de plantas na área com a produtividade. O autor relata que as perdas de produção mudam em função da idade do canavial, ou seja, uma cana-planta, que é primeiro ano de condução da cultura, a relação entre produção e perdas é de 0,38%:1%, enquanto para cana-soca, cana de segundo ano ou mais de cultivo, essa relação é de 0,32%:1%. Portanto, nessas condições a cana-de-açúcar exerce o efeito compensatório de 68% sob as áreas com falhas. Um exemplo gráfico do efeito compensatório pela localização da planta na extremidade da falha é apresentado na Figura 1.2.

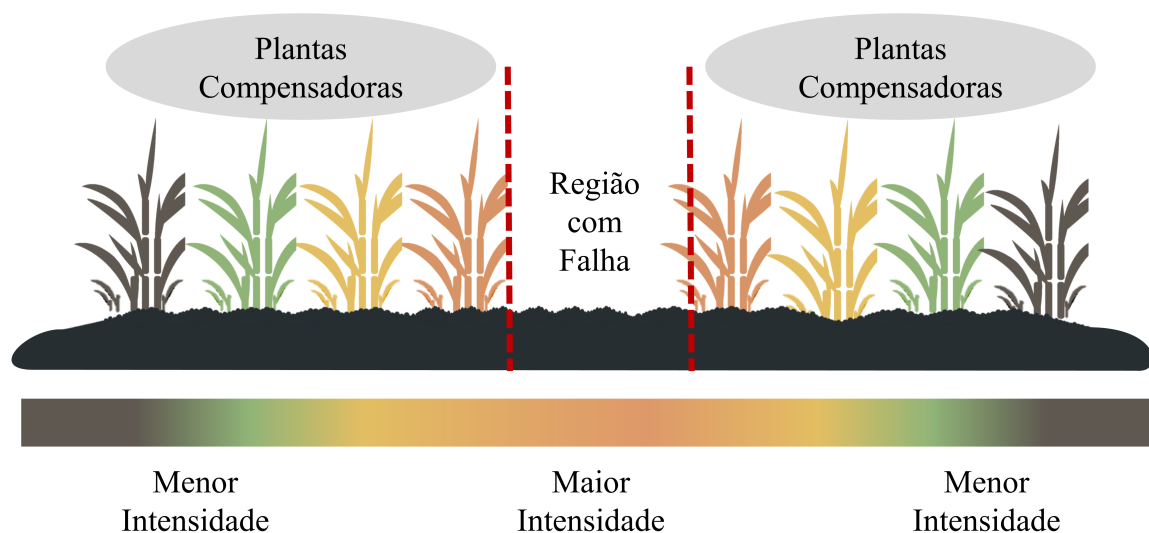


Figura 1.2: Ilustração do efeito compensatório de produção em função da localização das plantas na extremidade das falhas nas linhas de cana-de-açúcar.

Embora exista esse efeito compensatório evidenciado por Stolf, ainda existem lacunas quanto ao efeito compensatório de novas variedades, uma vez que, atualmente as variedades e técnicas de manejo do canavial mudaram, principalmente em relação a queimada da cana-de-açúcar, as quais de acordo com o projeto de Lei nº 11.241/2002, prevê um prazo para eliminação gradativa do uso de queimada para manejo da palhada dos canaviais de: 20% de redução imediata da área cortada; 30% a partir de 2006; 50% a partir de 2011; 80% a partir de 2016 e 100% até 2021 (ROSSETTO, 2021).

Por essa razão, surgiu a necessidade do desenvolvimento de novas cultivares capazes de atender o quesito de colher mecanicamente. Além disso, com o processo de colheita totalmente mecanizado, é necessário a utilização de transbordos para levar o material colhido para a indústria, conseqüentemente há maior tráfego de máquinas sob a lavoura, o que pode aumentar a compactação das áreas e pisoteio das soqueiras (BERNACHE et al., 2020; RAMOS et al., 2015). Portanto, essa condição pode influenciar no efeito compensatório no cenário atual do setor canavieiro, o que justifica novos estudos, pois a compreensão básica desses fatores é necessária para tomada de decisão sobre estratégias de manejo utilizando as informações de falhas.

1.2.5 Uso de fertilizantes em cana-de-açúcar

Uma série de abordagens foram propostas para aumentar a produtividade e longevidade do canavial, como por exemplo: o uso de direcionamento automático de veículos para evitar o pisoteio de soqueiras e compactação generalizada (NARDO et al., 2021; SOUSA et al., 2017), e a aplicação de fertilizantes e corretivos de solo em taxa variável baseado em mapas de recomendação (AMARAL; TREVISAN; MOLIN, 2018; KANKE et al., 2016; LOFTON et al., 2012).

Essas práticas visam manter as soqueiras totalmente saudáveis, ou seja, sem danos, sejam do pisoteio por máquinas ou de danos das facas de corte durante a operação de colheita. Utilizar os insumos de maneira eficiente, traz o incremento da produtividade e longevidade do canavial. O uso de fertilizantes e corretivos, por sua vez, sejam eles orgânicos ou minerais é uma das práticas mais comuns adotadas na agricultura, pois através de sua aplicação é possível suprir as deficiências nutricionais da cultura e assim garantir que cultura tenha condições para atingir a produtividade esperada.

Atualmente com os avanços tecnológicos existentes é possível saber quais são as exigências nutricionais da cultura a sua localização no campo de produção e, dessa forma, utilizar as doses dos fertilizantes e corretivos de acordo com as necessidades das plantas para aplicá-los de acordo com sua localização no campo de produção, utilizando máquinas e implementos com sistemas de navegação distribuição controlados por computador. É possível aumentar a produtividade e longevidade do canavial, uma vez que devem ser obtidas, principalmente, pelo melhor uso dos insumos a partir da adoção de boas práticas de manejo e novas tecnologias que permitem o manejo local da fertilidade do solo (SANCHES et al., 2021).

O uso dessas tecnologias no setor canavieiro pode tornar a produção mais sustentável, não somente pelo aumento da produtividade e longevidade do canavial, mas também, pela economia do uso de insumos, aumento da lucratividade, aumento da qualidade do material colhido, segurança alimentar e desenvolvimento tecnológico da cadeia de produção (SANCHES et al., 2021; ZAMYKAL; EVERINGHAM, 2009).

A cana de açúcar, como mencionou-se anteriormente, é uma cultura que pode atingir altas produtividades, mas na última década a produtividade está estagnada e não se obtém incrementos significativos. A cultura tem um grande exigência nutricional, os elementos minerais desta cultura constituem de 3 a 5% de sua matéria seca (SANCHES et al., 2021). Além disso, para se acumular 100 toneladas de colmos produzidos são necessários de 100–154 kg de N; 15–25 kg P₂O₅; 77–232 kg K₂O; e 14-49 kg S (CASTRO; FRANCO, 2019; FERREIRA et al., 2016; FRANCO et al., 2007; VITTI et al., 2007).

Como a cultura é cultivada por alguns anos, essa quantidade de nutrientes deve ser repostada para permitir uma produção sustentável, sem que ocorra a diminuição ou a degradação da fertilidade do solo ao longo de todos esses anos (CASTRO; FRANCO, 2019; FERREIRA et al., 2016; FRANCO et al., 2007; VITTI et al., 2007). Os nutrientes N e K, contribuem para que a cultura da cana-de-açúcar mantenha sua produtividade de acordo com o esperado pelos produtores, principalmente por serem essenciais para o desenvolvimento da cultura e contribuir com o bom desenvolvimento nas seguintes fases de crescimento: brotação, perfilhamento, crescimento do colmo e formação de açúcares (NETO et al., 2006). Portanto, o manejo estratégico desses fertilizantes torna-se indispensável para garantir a produção da cultura. Um exemplo ilustrativo das fases de crescimento da cana-de-açúcar é apresentado na Figura 1.3.

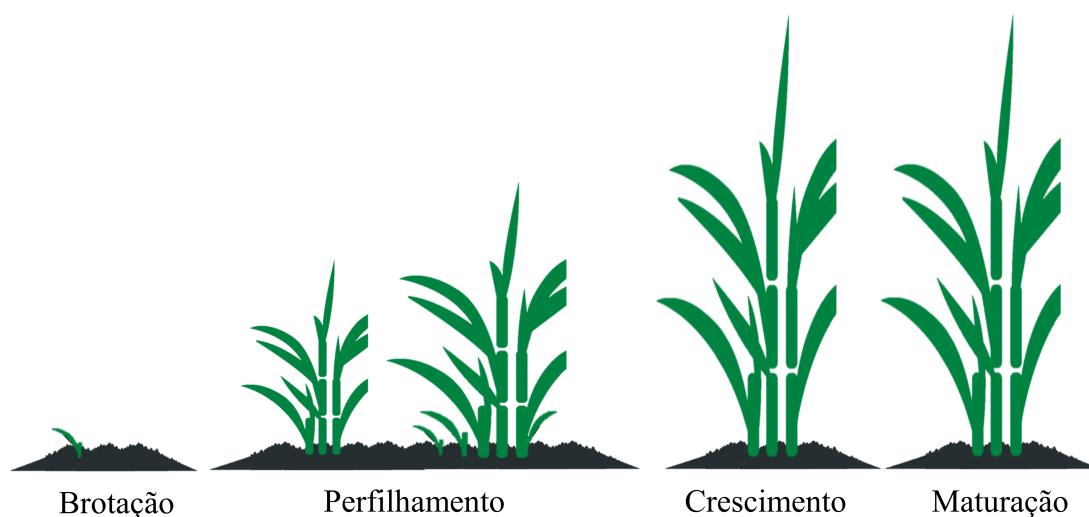


Figura 1.3: Ilustração das fases de crescimento da cana-de-açúcar.

SANCHES et al (2021) relataram que implementar o manejo adequado de calcário e formulações NPK ajudam equilibrar e estabilizar o conteúdo de nutrientes no solo, permitindo rendimentos lucrativos na cana-de-açúcar. Os autores relataram que a fertilidade do solo pode diminuir o K ao longo dos ciclos de cultivo, indicando que é necessário um ajuste fino desta recomendação. Dessa maneira é possível garantir que não haverá degradação/diminuição deste nutriente ao longo dos anos de cultivo. Além disso, a recomendação de N com base em produtividade deve buscar alternativas para aplicação em taxa variável, devido a falta de estabilidade da produtividade ao longo do ciclo de produção. Portanto, é indispensável que novos métodos sejam desenvolvidos e avaliados, de modo a usar os nutrientes de maneira mais sustentável.

O uso inadequado desses nutrientes pode ser prejudicial ao meio ambiente por meio da liberação de gases os quais contribuem para o efeito estufa da atmosfera (ZAHOUR et al., 2014). Atualmente esses fertilizantes são recomendados com base de uma série de exigências que podem estar relacionadas às condições de solo, clima e material genético da cana-de-açúcar (CANTARELLA; ROSSETTO, 2014). Esses nutrientes são aplicados utilizando equipamentos que os distribuem em todas as linhas de cana-de-açúcar de um canavial. Entretanto, como foi observado nas seções anteriores o pisoteio das soqueiras ao longo desses anos de cultivo, podem ocasionar falhas no canavial. Portanto, a aplicação dessa forma pode distribuir os fertilizantes em áreas onde não existem plantas conforme apresentado na Figura 1.4.

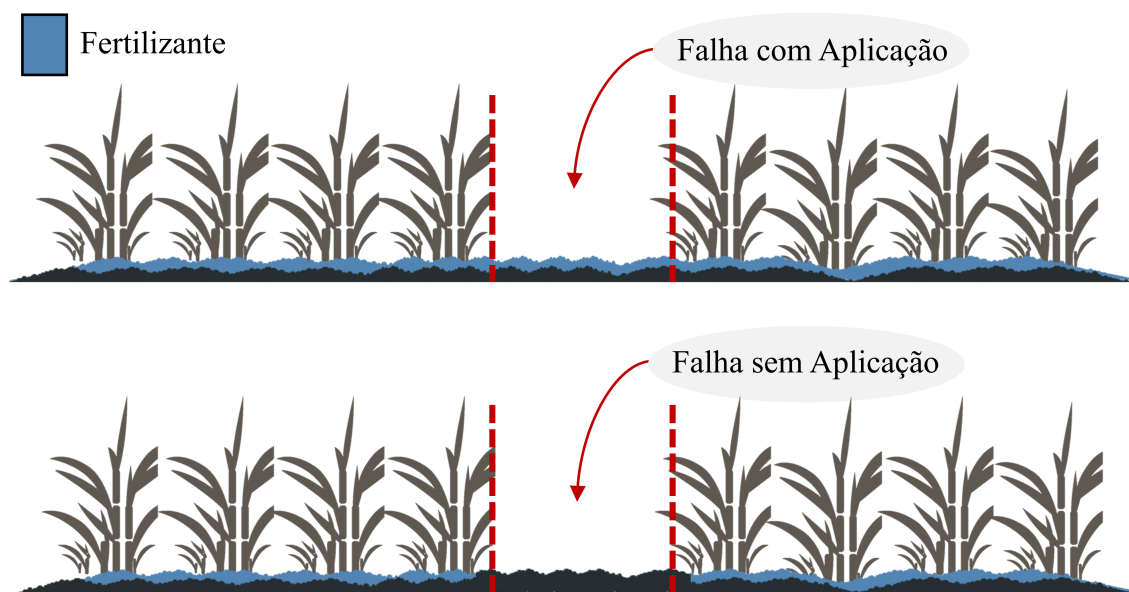


Figura 1.4: Ilustração do uso de fertilizante sob as áreas com falhas nas linhas de cana-de-açúcar.

De acordo com (STOLF, 1986), as plantas localizadas nas extremidades das falhas em campo, exercem efeito compensatório da produtividade, portanto, a aplicação de fertilizantes como N e K sobre as falhas podem significar um desperdício de nutrientes, ou até mesmo, ocasionar a maior disponibilidade destes para as plantas que estão localizadas nas extremidades das falhas, devido esses nutrientes possuírem mobilidade no solo (ERNANI; SANGOI; RAMPAZZO, 2002; NEVES; ERNANI; SIMONETE, 2009). Essa aplicação sobre as falhas pode ser benéfica ou não para as plantas vizinhas, mas certamente haverá uma aplicação superior do que a necessária. Se não fossem aplicados os fertilizantes sobre as falhas haveria uma economia direta no uso desse recurso, crescente proporcionalmente ao comprimento da falha.

Ainda não é conhecido qual o efeito da aplicação desses nutrientes sobre cada comprimento da falha na linha de cana-de-açúcar, assim, não é possível contabilizar os desperdícios e os impactos que tal utilização desses fertilizantes podem ocasionar no desenvolvimento e produção da cultura. Para entender esse fenômeno claramente, mais estudos são necessários. Conhecendo tais relações é possível desenvolver novos métodos para aplicação de fertilizantes, com a finalidade de economizar o uso de insumos, principalmente utilizando as informações do mapeamento de falhas que podem ser realizados utilizando sensores embarcados máquinas/implementos ou por meio do processamento de imagens adquiridas por VANTS.

1.3 Estrutura da tese

Com base na revisão de literatura, nota-se que ainda existem lacunas para serem avaliadas para melhorar a condução da cultura da cana-de-açúcar, principalmente em relação as questões:

1. Não é conhecido quais são os efeitos compensatórios da produtividade de plantas vizinhas a extremidade de uma falha de uma linha de cana-de-açúcar para variedades comercializadas atualmente.
2. Não é conhecido se esses efeitos variam em função do comprimento da falha, uma vez que, quanto maior o comprimento da falha, menos plantas existem e, portanto, é necessário que as plantas vizinhas das extremidades das falhas produzam massa extra para suprir a produtividade das plantas faltantes.
3. Não é conhecido se a utilização de nutrientes como N e K sobre as falhas pode auxiliar no incremento da produtividade das plantas localizadas em suas extremidades.
4. Não se sabe quais são os benefícios relacionados à economia da aplicação de fertilizantes sobre as falhas.

Portanto, esta tese estrutura-se da seguinte maneira: no Capítulo 2, verificou-se se as plantas da variedade RB86-7515, amplamente implantada nos canaviais de hoje, induzem efeito compensatório da produtividade quando localizadas nas extremidades das falhas, enquanto, no Capítulo 3 avaliaram-se os efeitos econômicos e produtivos da interrupção da aplicação de fertilizantes sobre as falhas nas linhas de cana-de-açúcar.

1.4 Referências

AGUIAR, A.; MILESSI, T. S.; MULINARI, D. R.; LOPES, M. S.; COSTA, S. M. da; CANDIDO, R. G. Sugarcane straw as a potential second generation feedstock for biorefinery and white biotechnology applications. **Biomass and Bioenergy**, v. 144, p. 105896, jan. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096195342030430X>. Acesso em: 12 jul. 2021.

AMARAL, L. R.; TREVISAN, R. G.; MOLIN, J. P. Canopy sensor placement for variable-rate nitrogen application in sugarcane fields. **Precision Agriculture**, v. 19, n. 1, p. 147–160, fev. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-017-9505-x>. Acesso em: 14 jul. 2021.

ATLASBIG. **Maps and Statistics of the World and Regions**. 2021. Disponível em: <https://www.atlasbig.com/en-us>. Acesso em: 12 jul. 2021.

BERNACHE, L.; TEDESCO-OLIVEIRA, D.; OLIVEIRA, L. P. d.; CORRÊA, L. N.; SILVA, R. P. d. CAN BASAL CUTTING BLADE WEAR AFFECT SUGARCANE RE-GROWTH? **Engenharia Agrícola**, v. 40, p. 53–60, fev. 2020, publisher: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/eagri/a/WPvJrvY4xLzxLVFz7nDjyBz/?format=html&lang=en>. Acesso em: 13 jul. 2021.

CANTARELLA, H.; ROSSETTO, R. FERTILIZERS FOR SUGARCANE. In: **Sugarcane bioethanol — R&D for Productivity and Sustainability**. Editora Edgard Blücher, 2014. p. 405–422. ISBN 978-85-212-0822-8. Disponível em: <http://openaccess.blucher.com.br/article-details/19258>. Acesso em: 14 jul. 2021.

CASTRO, S. G. Q. d.; FRANCO, H. C. J. **N-Fertilization Adjustment in Sugarcane Crop Cultivated in Intensive Mechanization**. IntechOpen, 2019. Publication Title: Nitrogen Fixation. ISBN 978-1-78984-649-2. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/nitrogen-fixation/n-fertilization-adjustment-in-sugarcane-crop-cultivated-in-intensive-mechanization>. Acesso em: 14 jul. 2021.

CHRISTOFOLETTI, C. A.; ESCHER, J. P.; CORREIA, J. E.; MARINHO, J. F. U.; FONTANETTI, C. S. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. **Waste Management**, v. 33, n. 12, p. 2752–2761, dez. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X1300408X>. Acesso em: 12 jul. 2021.

CONAB. ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA V.6 - SAFRA 2019/20 - N.4 - Quarto levantamento | ABRIL 2020, **Conab - Safra Brasileira de Cana-de-açúcar**. 2020. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/31590_6cfbbc41aa04783c69113c50fa499cba. Acesso em: 13 jul. 2021.

DÍAZ, M. J.; MADEJÓN, E.; LÓPEZ, F.; LÓPEZ, R.; CABRERA, F. Composting of vinasse and cotton gin waste by using two different systems. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 34, n. 4, p. 235–248, mar. 2002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344901001094>. Acesso em: 12 jul. 2021.

ERNANI, P.; SANGOI, L.; RAMPAZZO, C. Lixiviação e imobilização de nitrogênio num nitossolo como variáveis da forma de aplicação da uréia e da palha de aveia. **Revista brasileira de ciência do solo**, SciELO Brasil, v. 26, n. 4, p. 993–1000, 2002.

FENG, L.; ZHANG, Z.; MA, Y.; DU, Q.; WILLIAMS, P.; DREWRY, J.; LUCK, B. Alfalfa yield prediction using UAV-based hyperspectral imagery and ensemble learning. **Remote Sensing**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 12, n. 12, p. 2028, 2020.

FERREIRA, D. A.; FRANCO, H. C. J.; OTTO, R.; VITTI, A. C.; FORTES, C.; FARONI, C. E.; GARSIDE, A. L.; TRIVELIN, P. C. O. Contribution of N from green harvest residues for sugarcane nutrition in Brazil. **GCB Bioenergy**, v. 8, n. 5, p. 859–866, 2016, eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/gcbb.12292>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcbb.12292>. Acesso em: 14 jul. 2021.

FRANCO, H. C. J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E.; VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O. Acúmulo de macronutrientes em cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada e dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio. **Bragantia**, v. 66, p. 669–674, 2007, publisher: Instituto Agronômico de Campinas. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/brag/a/cGt3sfVwz5mPxRfry5jR45g/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 14 jul. 2021.

GRANCO, G.; SANT'ANNA, A. C.; BERGTOLD, J. S.; CALDAS, M. M. Factors influencing ethanol mill location in a new sugarcane producing region in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 111, p. 125–133, abr. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953418300321>. Acesso em: 12 jul. 2021.

HEERDEN, P. D. R. V.; DONALDSON, R. A.; WATT, D. A.; SINGELS, A. Biomass accumulation in sugarcane: unravelling the factors underpinning reduced growth phenomena. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 11, p. 2877–2887, jun. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erq144>. Acesso em: 12 jul. 2021.

IEA. **Instituto de Economia Agrícola (IEA)**. 2021. Disponível em: <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=15931>. Acesso em: 13 jul. 2021.

JÚNIOR, M. R. B. MAPEAMENTO DE FALHAS EM CANA-DE-AÇÚCAR POR IMAGENS DE VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO. p. 51, 2021.

KANKE, Y.; TUBAÑA, B.; DALEN, M.; LOFTON, J.; VIATOR, H. Relation between Early Season–Measured Agronomic Variables and Sugar Yield Responses to Nitrogen. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 2, p. 794–804, 2016, eprint: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/agronj2015.0037>. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj2015.0037>. Acesso em: 14 jul. 2021.

LAGO, A. C. D.; BONOMI, A.; CAVALETT, O.; CUNHA, M. Pereira da; LIMA, M. A. P. Sugarcane as a carbon source: The Brazilian case. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, p. 5–12, nov. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953412003479>. Acesso em: 12 jul. 2021.

LENNON, R. Remote sensing digital image analysis: An introduction. **United States: Esa/Esrin**, 2002.

LOFTON, J.; TUBANA, B. S.; KANKE, Y.; TEBOH, J.; VIATOR, H.; DALEN, M. Estimating Sugarcane Yield Potential Using an In-Season Determination of Normalized Difference Vegetative Index. **Sensors**, v. 12, n. 6, p. 7529–7547, jun. 2012, number: 6 Publisher: Molecular Diversity Preservation International. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/12/6/7529>. Acesso em: 14 jul. 2021.

LUNA, I.; LOBO, A. Mapping Crop Planting Quality in Sugarcane from UAV Imagery: A Pilot Study in Nicaragua. **Remote Sensing**, v. 8, n. 6, p. 500, jun. 2016, number: 6 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/6/500>. Acesso em: 12 jul. 2021.

MALDANER, L. F.; MOLIN, J. P.; MARTELLO, M.; TAVARES, T. R.; DIAS, F. L. Identification and measurement of gaps within sugarcane rows for site-specific management: Comparing different sensor-based approaches. **Biosystems Engineering**, Elsevier, v. 209, p. 64–73, 2021.

MISHRA, P.; KHATIB, A. M. G. A.; SARDAR, I.; MOHAMMED, J.; KARAKAYA, K.; DASH, A.; RAY, M.; NARSIMHAIAH, L.; DUBEY, A. Modeling and Forecasting of Sugarcane Production in India. **Sugar Tech**, jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01004-3>. Acesso em: 12 jul. 2021.

MOLIN, J. P.; VEIGA, J. P. S. Spatial variability of sugarcane row gaps: measurement and mapping. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, p. 347–355, jun. 2016, publisher: Editora da Universidade Federal de Lavras. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/cagro/a/gcDL8xsB4ZwLcTLDkRb6L7q/?lang=en>. Acesso em: 12 jul. 2021.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C. Potential and Actual Sugarcane Yields in Southern Brazil as a Function of Climate Conditions and Crop Management. **Sugar Tech**, v. 16, n. 3, p. 264–276, set. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12355-013-0275-0>. Acesso em: 14 jul. 2021.

NARDO, L. A. S.; PAIXÃO, C. S. S.; GONZAGA, A. R.; OLIVEIRA, L. P.; VOLTARELLI, M. A.; SILVA, R. P. Software Optimisation for Mechanised Sugarcane Planting Scenarios to Aid in Decision-Making. **Sugar Tech**, v. 23, n. 1, p. 86–93, fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12355-020-00868-1>. Acesso em: 14 jul. 2021.

NASERI, H.; PARASHKOOHI, M. G.; RANJBAR, I.; ZAMANI, D. M. Energy-economic and life cycle assessment of sugarcane production in different tillage systems. **Energy**, v. 217, p. 119252, fev. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220323598>. Acesso em: 12 jul. 2021.

NETO, J. D.; FIGUEREDO, J. L. C.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO HAMILTON M. ND AZEVEDO, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 283–288, jun. 2006, publisher: Departamento de Engenharia Agrícola - UFCEG. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/rbeaa/a/Mdbny4VBnjZKFvsqXjD5bzb/?lang=pt>. Acesso em: 14 jul. 2021.

NEVES, L. S.; ERNANI, P. R.; SIMONETE, M. A. Mobilidade de potássio em solos decorrente da adição de doses de cloreto de potássio. **Revista Brasileira de Ciência**

do Solo, v. 33, p. 25–32, fev. 2009, publisher: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/rbcs/a/HYQwxBKxfKYY8tCqJYMZkWD/?lang=pt>. Acesso em: 14 jul. 2021.

OSCO, L. P.; ARRUDA, M. S. de; GONÇALVES, D. N.; DIAS, A.; BATISTOTI, J.; SOUZA, M.; GOMES, F. D. G.; RAMOS, A. P. M.; JORGE, L. A. C.; LIESENBERG, V. et al. A CNN approach to simultaneously count plants and detect plantation-rows from UAV imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Elsevier, v. 174, p. 1–17, 2021.

PARK, S.-U.; LEE, C.-J.; KIM, S.-E.; LIM, Y.-H.; LEE, H.-U.; NAM, S.-S.; KIM, H. S.; KWAK, S.-S. Selection of flooding stress tolerant sweetpotato cultivars based on biochemical and phenotypic characterization. **Plant Physiology and Biochemistry**, Elsevier, v. 155, p. 243–251, 2020.

POBLETE, T.; ORTEGA-FARÍAS, S.; RYU, D. Automatic coregistration algorithm to remove canopy shaded pixels in UAV-borne thermal images to improve the estimation of crop water stress index of a drip-irrigated Cabernet Sauvignon vineyard. **Sensors**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 18, n. 2, p. 397, 2018.

RAMOS, C. R. G.; LANÇAS, K. P.; SANDI, J.; LYRA, G. A.; MILLANI, T. M. QUALIDADE DO CORTE DOS REBOLOS NA COLHEITA MECANIZADA DA CANA-DE-AÇÚCAR EM DIFERENTES CONDIÇÕES OPERACIONAIS. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 30, n. 3, p. 217–224, nov. 2015, number: 3. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/1890>. Acesso em: 13 jul. 2021.

ROSSETTO, R. **Queima**. 2021. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_92_22122006154841.html. Acesso em: 13 jul. 2021.

SANCHES, G. M.; MAGALHÃES, P. S. G.; KOLLN, O. T.; OTTO, R.; RODRIGUES, F.; CARDOSO, T. F.; CHAGAS, M. F.; FRANCO, H. C. J. Agronomic, economic, and environmental assessment of site-specific fertilizer management of Brazilian sugarcane fields. **Geoderma Regional**, v. 24, p. e00360, mar. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352009421000055>. Acesso em: 14 jul. 2021.

SANTOS, A. F. D.; CORREA, L. N.; LACERDA, L. N.; TEDESCO-OLIVEIRA, D.; PILON, C.; VELLIDIS, G.; SILVA, R. P. da. High-resolution satellite image to predict peanut maturity variability in commercial fields. **Precision Agriculture**, Springer, p. 1–15, 2021.

SANTOS, M. A. L.; SILVA, S.; ZOCOLER, J. L.; TEODORO, I.; NETO, J. D. Avaliação de falhas na brotação da cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica. **M. A. L.**, v. 9, n. 4, p. 6, 2013.

SCHWALBERT, R. A.; AMADO, T.; CORASSA, G.; POTT, L. P.; PRASAD, P. V.; CIAMPITTI, I. A. Satellite-based soybean yield forecast: Integrating machine learning and weather data for improving crop yield prediction in southern Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, Elsevier, v. 284, p. 107886, 2020.

SOUSA, A. C. M.; SOUZA, Z. M.; CLARET, R. M. P.; TORRES, J. L. R. TRAFFIC CONTROL WITH AUTOPILOT AS AN ALTERNATIVE TO DECREASE SOIL COMPACTION IN SUGARCANE AREAS. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 20, n. 1, maio 2017, number: 1. Disponível em: <https://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/2283>. Acesso em: 14 jul. 2021.

SOUZA, C. H. W. D.; LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V.; MAGALHÃES, P. S. G. Mapping skips in sugarcane fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) images. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier, v. 143, p. 49–56, 2017.

STOLF, R. Methodology for gap evaluation on sugarcane lines. **Methodology for gap evaluation on sugarcane lines**, v. 4, p. 12–20, 1986.

STOLF, R. Índice de falhas segundo o método de STOLF: correlação com o rendimento agrícola em soqueiras de cana-de-açúcar. v. 11, p. 12–16, 1991.

TAYT'SOHN, F. C. O.; NUNES, A. M. B.; PEREIRA, A. O. Assessing sugarcane expansion to ethanol production under climate change scenarios in Paranaíba river basin – Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 119, p. 436–445, dez. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953418302691>. Acesso em: 12 jul. 2021.

TEDESCO, D.; OLIVEIRA, M. F. D.; SANTOS, A. F. dos; SILVA, E. H. C.; ROLIM, G. de S.; SILVA, R. P. da. Use of remote sensing to characterize the phenological development and to predict sweet potato yield in two growing seasons. **European Journal of Agronomy**, Elsevier, v. 129, p. 126337, 2021.

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; PENATTI, C. P.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E.; FRANCO, H. C. J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 249–256, fev. 2007, publisher: Embrapa Secretaria de Pesquisa e Desenvolvimento, Pesquisa Agropecuária Brasileira. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/pab/a/Gbnqw7pVYWTw48xLhBT8Pmz/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 14 jul. 2021.

VONG, C. N.; CONWAY, L. S.; ZHOU, J.; KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A. Early corn stand count of different cropping systems using UAV-imagery and deep learning. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier, v. 186, p. 106214, 2021.

ZAHOOR; AHMAD, W.; HIRA, K.; ULLAH, B.; KHAN, A.; SHAH, Z.; KHAN, F. A.; NAZ, R. M. M. Role of nitrogen fertilizer in crop productivity and environmental pollution. **International Journal of Agriculture and Forestry**, v. 4, n. 3, p. 201–206, 2014, publisher: Scientific and Academic Publishing. Disponível em: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20143234539>. Acesso em: 14 jul. 2021.

ZAMYKAL, D.; EVERINGHAM, Y. L. Sugarcane and Precision Agriculture: Quantifying Variability Is Only Half the Story – A Review. In: LICHTFOUSE, E. (Ed.). **Climate Change, Intercropping, Pest Control and Beneficial Microorganisms: Climate**

change, intercropping, pest control and beneficial microorganisms. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009, (Sustainable Agriculture Reviews). p. 189–218. ISBN 978-90-481-2716-0. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-90-481-2716-0_9. Acesso em: 14 jul. 2021.

CAPÍTULO 2 – Efeito compensatório de falhas em cana-de-açúcar e a relação entre perdas e o percentual de falhas

2.1 Resumo

Um dos fatores que degradam a produção das lavouras de cana-de-açúcar ao longo dos anos de cultivo, são as falhas nas linhas da cultura. No entanto, ainda é pouco conhecido o quanto as falhas podem afetar a produção, principalmente pelo fato de existirem falhas com diferentes comprimentos na mesma lavoura. Dessa maneira, nesse capítulo, testa-se a hipótese de que o tamanho mínimo de falhas deve ser estabelecido a partir de seu efeito sobre a produtividade da lavoura. O objetivo do presente capítulo foi adaptar a metodologia de determinação de falhas na cana-de-açúcar proposta por STOLF (1986) às condições de cultivo atuais. Uma vez que as cultivares, técnicas de cultivos e novas tecnologias passaram ser adotadas nas últimas décadas. Avaliou-se se as falhas induzem efeito compensatório nas plantas em suas extremidades e determinou-se as perdas relativas na produtividade em lavouras analisando mapas de falhas, os resultados do presente capítulo mostraram que existe um fator de compensação atribuído às plantas próximas às falhas por conta da maior luminosidade disponível, que se mantém em qualquer comprimento da falha, e garante que falhas de até 0,48 m não tragam prejuízos à produção da lavoura de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Produtividade, RB86-7515, método de Stolf, mapeamento de falhas.

2.2 Introdução

A área cultivada de cana-de-açúcar no Brasil aumentou 1,9% na safra 2020/2021 (CONAB, 2020), devido à demanda crescente de biocombustíveis (BORDONAL et al., 2018). A maior parte da produção se concentra no estado de São Paulo (SILVA et al., 2021), onde a cultura é uma das principais atividades praticadas no agronegócio (TAYT'SOHN; NUNES; JUNIOR, 2018), correspondendo a 36% do PIB do setor (IEA, 2021). No primeiro corte da cana-de-açúcar é comum observar produtividades acima de 100 toneladas por hectare, enquanto no último corte da cultura, esta muitas vezes não alcança 60 toneladas por hectare, o que leva a produtividade brasileira à média de 77 toneladas por hectare (CONAB, 2020). O decréscimo produtivo se deve à redução da capacidade fotossintética das lâminas foliares que vem com o envelhecimento das plantas (HEERDEN et al., 2010), mas também pode ser relacionado com o aumento das falhas de rebrota nas lavouras.

Falhas são trechos na linha de cultivo onde há ausência de plantas (STOLF, 1986), causada por problemas de plantio, quando danos às gemas durante o processo de distribuição de mudas reduz sua capacidade de brotação, e também por injúrias à soqueira recorrentes das operações de cultivo e colheita (OTTO et al., 2011; SANTOS et al., 2013; SOUZA et al., 2015). Atualmente, adota-se no Brasil para critério de classificação de trechos de falhas em lavoura de cana-de-açúcar a metodologia de (STOLF, 1986). O autor classificou as falhas analisando padrões de ocorrência e afirmou que as falhas são trechos maiores que 0,50 m sem a presença de plantas na linha de cultivo. Em outros experimentos (STOLF, 1986; STOLF, 1991), foram classificadas falhas e contabilizada sua ocorrência, os autores descobriram que a relação entre perdas de produtividade e o percentual de falhas é de 0,38:1% em cana-planta e 0,32:1% em cana-soca, ou seja, a cana-de-açúcar exerce efeito compensatório de 68% sobre os trechos de falhas.

Neste trabalho, testa-se a hipótese de que o tamanho mínimo de falhas deve ser estabelecido a partir de seu efeito sobre a produtividade da lavoura, portanto, o comprimento de 0,50 m (determinado a partir de padrões de ocorrência) pode não equivaler ao prejuízo causado pelas falhas. Além disso, o efeito compensatório apresentado por (STOLF, 1991) em soqueira pode ter sofrido alterações com a troca das variedades utilizadas e das técnicas de cultivo que passaram a ser adotadas nas últimas décadas. Portanto, o trabalho objetiva adaptar a metodologia de determinação de falhas na cana-de-açúcar proposta por STOLF (1986) às condições de cultivo contemporâneas, avaliando se as falhas induzem efeito compensatório nas plantas em suas extremidades e determinar as perdas relativas na produtividade em lavouras analisando mapas de falhas.

2.3 Material e Métodos

O experimento foi instalado em área de comercial próxima à Descalvado, São Paulo, Brasil (W 47°36' S 21°54', altitude de 679 m). O solo da área é classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico, A moderado ou proeminente, textura argilosa, relevo suave ondulado (6,3% de declive) (ROSSI, 2017). A região apresenta classificação climática 'Aw' clima tropical com estação seca de inverno (KÖPPEN; GEIGER, 1928).

O canavial foi implantado em 14 de dezembro de 2017, com linhas espaçadas a 1,40 metros com a variedade RB86-7515, que apresenta alta produtividade. Esta variedade é recomendada para ambientes de produção C e D, apresenta maturação média, alto teor de sacarose, baixa isoporização, maior susceptibilidade a danos causados pela mecanização, e é uma das variedades mais plantadas nos últimos anos (JUNIOR et al., 2019).

A adubação da área ocorreu no 38º dia após a primeira colheita com fertilizante na forma líquida na formulação (NPK) 12-03-15 no volume de 704 L ha⁻¹, combinada aos inseticidas Bifentrina na concentração de 400 g L⁻¹ na dosagem de 0,16 L ha⁻¹ e Fipronil na concentração de 600 g L⁻¹ na dosagem de 0,4 L ha⁻¹, posicionado a 0,05 m de profundidade no centro da soqueira usando cortador de soqueiras de 3 linhas, com dois tanques para produto, sendo um para inseticida e outro para o fertilizante.

Foram delimitados quatro blocos com seis parcelas casualizadas de três linhas e dez metros em cada. Em cinco das seis parcelas, foram criadas intencionalmente falhas com comprimentos distintos (0,50 m, 1,00 m, 1,50 m, 2,00 m e 2,50 m) e na sexta parcela, tratamento controle (TC), não foram provocadas falhas.

Para avaliar se as falhas poderiam induzir efeito compensatório nas plantas dependendo da sua distância em relação às extremidades da falha, três zonas amostrais foram determinadas (ZN1 = 0,00 a 0,50 m em relação à falha; ZN2 = 0,51 a 1,00 m em relação à falha e; ZN3 1,01 a 1,50 m em relação à falha). As três zonas amostrais se repetiram em ambos os lados das falhas para aumentar a confiabilidade dos dados, e foram consideradas réplicas durante as avaliações (Figura 2.1).

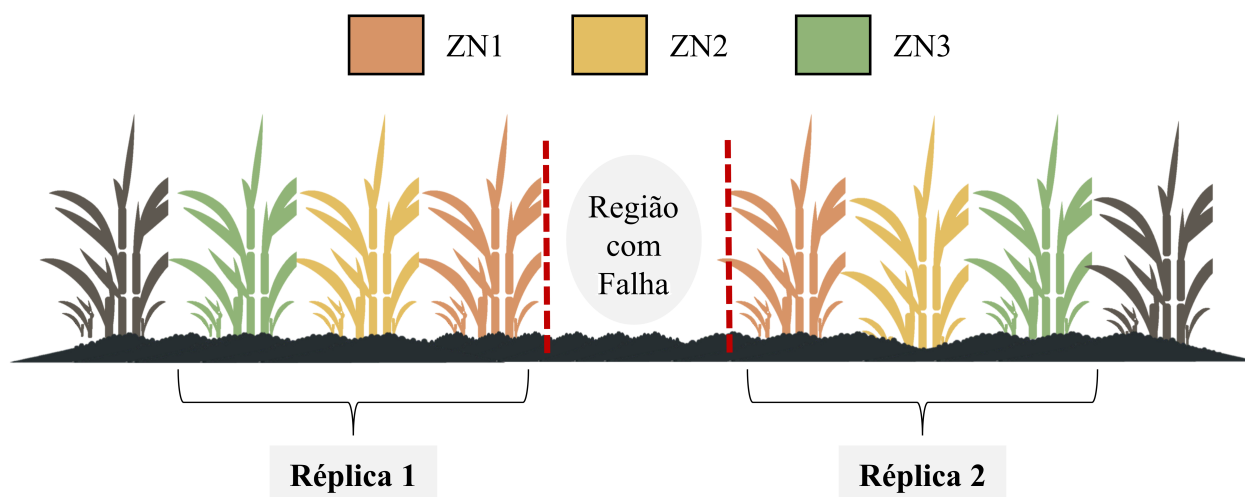


Figura 2.1: Disposição das zonas amostrais perante as falhas.

Foram realizadas cinco avaliações em cada zona amostral durante o experimento. Na primeira avaliação foi realizada a contagem de perfilhos e a medição das alturas de plantas. Por ter sido realizada logo quando as falhas foram provocadas, esta avaliação restringe-se a avaliar a casualização das parcelas.

Na segunda e na terceira avaliação foi executada a contagem de perfilhos e medição das alturas de plantas. Realizada após a implantação dos tratamentos, estas avaliações objetivaram estudar os efeitos da aplicação de fertilizantes sobre as falhas na fase de perfilhamento da cana-de-açúcar. Na quarta avaliação contou-se o número de colmos, mediu-se a altura das plantas e o diâmetro dos colmos.

Na quinta, e última, avaliação, foram medidos massa dos colmos produzidos e os parâmetros tecnológicos dos colmos, contabilizando BRIX (%), Fibra (%), Pureza (%), Pol da cana (%), Açúcares redutores (A.R. %) e Açúcares totais recuperáveis (ATR, em kg tonelada⁻¹) de acordo com metodologia de FERNANDES (2000).

2.3.1 Métodos adotados na avaliação dos parâmetros de desempenho

2.3.1.1 Contagem de perfilho

Foram contabilizados os perfilhos com mais de 0,10 m de altura (do solo até o ápice) manualmente, utilizando gabaritos para delimitar ZN1, ZN2 e ZN3. As réplicas em ambos os lados das parcelas compuseram uma média, que foi multiplicada por 2 para representar a quantidade de perfilhos em 1,00 metros de linha cultivada.

2.3.1.2 Altura de plantas

Usou-se uma trena com graduação métrica. Nas avaliações 1, 2 e 3, a trena foi posicionada entre a superfície do solo e ápice da folha mais alta da planta mais alta da zona amostral (Figura 2.2a). Na 4ª avaliação a altura de plantas passou a ser contabilizada como altura do colmo, aferindo-se a altura entre o solo e a inserção da primeira folha com aurícula visível, conhecida como folha +1 (Figura 2.2b).

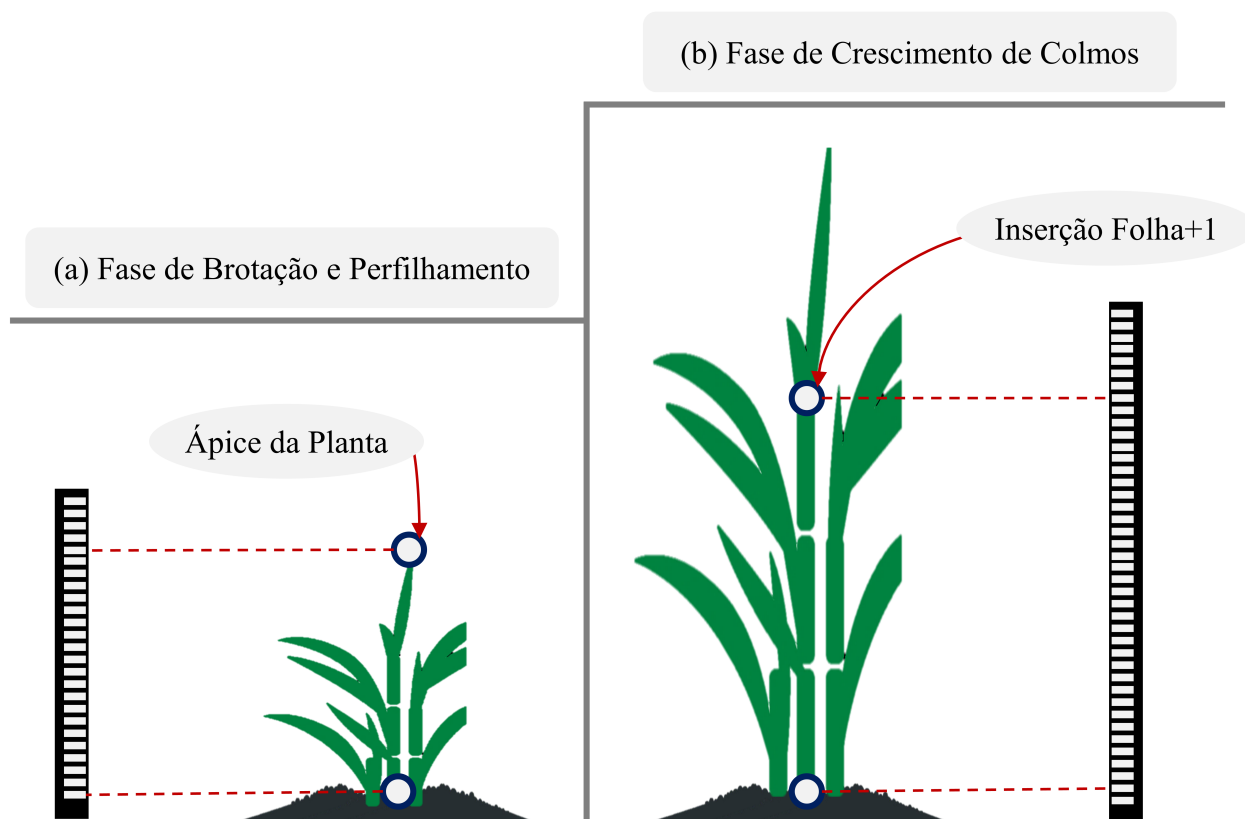


Figura 2.2: Métodos de medição de altura nas fases de brotação e perfilhamento (a) e na fase de crescimento de colmos (b).

2.3.1.3 Diâmetro e massa de colmos

Foram realizadas 3 leituras por zona amostral, posicionando um paquímetro digital com precisão de $\pm 0,01$ mm no terço médio dos colmos. As zonas amostrais foram colhidas manualmente. Os colmos foram limpos, retirando ponteira e folhas. A massa dos colmos produzidos foi aferida usando uma balança com precisão de $\pm 0,001$ kg.

2.3.1.4 Parâmetros tecnológicos

Amostras dos colmos colhidos nas zonas amostrais foram submetidas a análises conforme metodologia de FERNANDES (2002). As análises foram ordenadas por bloco, sendo que todos foram analisados em um intervalo de 12 horas.

2.3.2 Análise estatística

Os dados foram analisados por meio do software AgroEstat versão 1.1.0.714 (BARBOSA MALDONATO, 2015), submetidos à análise de variância ($p < 0,05$) e, nos casos em que o F foi significativo, à comparação de médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Quando houve diferença entre os tratamentos, estes foram comparados ao tratamento controle, para determinar qual o acréscimo na produtividade das plantas nas extremidades das falhas, em função da extensão da falha.

2.3.2.1 Relação entre decréscimo na produtividade e o percentual de falhas

Para determinar se há relação entre a perda de produtividade e o percentual de falhas utilizou-se cinco mapas de falhas de áreas de cortes distintos (Tabela 2.1). Foi levantado o tamanho médio (TM) de cada um dos mapas de falhas, dos quais subtraiu-se o fator de compensação determinado no experimento realizado.

Tabela 2.1: Características dos campos de produção de cada mapa de falha utilizado.

Nome do talhão	Idade do Corte	Área (ha^{-1})	Falhas (%)	Variedade
Talhão 03	2º corte	7,89	14,31	CTC-2
Talhão 20	3º corte	9,81	23,61	RB59-0296
Talhão 18	4º corte	8,66	35,27	CTC-2
Talhão 08	5º corte	28,56	27,08	CTC-2
Talhão 07	7º corte	18,37	25,09	CTC-2

2.4 Resultados

Houve disparidade entre a produtividade do talhão informada pela usina após a colheita (77,71 toneladas ha^{-1}) e a produtividade do tratamento controle (TC), avaliada nos trechos sem falhas. A produtividade de TC foi equivalente a 95,9 toneladas de cana-de-açúcar por hectare, ou 6,72 kg a cada zona amostral. Parte da diferença entre a produtividade, 2,05 toneladas ha^{-1} (11%), se deve a perdas durante a operação de colheita, o restante pode corresponder a falhas de plantio ou rebrota.

A produtividade caracterizada nos trechos sem falhas se posicionou dentro dos limites estabelecidos pelo desvio mínimo significativo (DMS) apontado pelo teste de Tukey (5%) em ZN2 e ZN3, indicando que essas zonas amostrais não apresentaram capacidade de compensação de falhas, diferente de ZN1.

Em ZN1, posicionada nas extremidades das falhas, a produtividade foi 3,24 kg superior à produção de TC, e 2,21 kg superior à produção de ZN2 (Figura 2.3). Considerando o efeito em ambas as extremidades das falhas, o fator de compensação foi de 6,48 kg por falha, representando 0,48 metros de falha. O efeito compensatório nas zonas amostrais não foi afetado pelo comprimento das falhas ($p>0,05$).

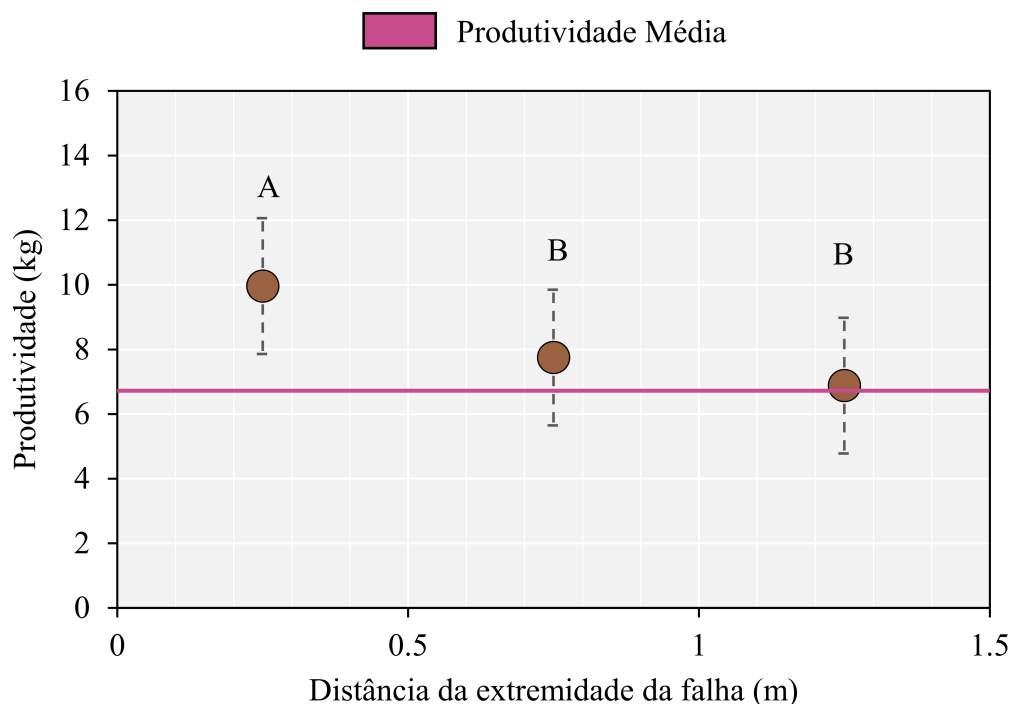


Figura 2.3: Produtividade das zonas amostrais comparadas entre si pelo teste de tukey à nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade. Em rosa, produtividade média caracterizada em trechos distantes de falha.

2.4.1 Parâmetros biométricos

Os parâmetros biométricos avaliados periodicamente após a colheita explicam o comportamento expresso na produtividade de ZN1. Aos 60 dias após a colheita (60 DAC), foi mensurada diferença no perfilhamento de ZN1 ($p < 0,05$), em que foi maior que em ZN2 (Tabela 2.2).

Tabela 2.2: Análise temporal do número de perfilhos nas zonas amostrais. Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si na linha, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Avaliação	ZN1	ZN2	ZN3
60 dias	17,4 a	14,6 b	15,4 ab
90 dias	23,3 a	19,8 b	21,5 ab
180 dias	14,0 a	11,8 b	11,7 b

Aos 90 dias após a colheita (90 DAC) o comportamento se manteve e aos 180 dias após a colheita (180 DAC) ZN1 apresentou em média 2,2 colmos a mais que ZN2 e ZN3, que apresentaram 11,8 e 11,7 colmos respectivamente. O diâmetro dos colmos e a altura de plantas não foram influenciados pelos tamanhos de falhas ou pelas zonas amostrais ($p > 0,05$).

2.4.2 Parâmetros tecnológicos

Nenhum dos parâmetros tecnológicos foi afetado pelos comprimentos de falha em nenhuma das zonas amostrais ($p > 0,05$), portanto, pode-se considerar que a cana produzida adicionalmente pelas plantas vizinhas próximas das falhas apresenta a mesma qualidade das plantas no restante do talhão.

2.5 Discussão

Os resultados encontrados complementam a tese de STOLF (1986), que afirma que devem ser consideradas falhas trechos maiores que 0,50 metros sem a presença de plantas na linha de cultivo. Neste trabalho, observou-se que 0,48 m sem a presença de plantas é compensado pelas plantas vizinhas. Por estar próximo do valor adotado por STOLF, que é adotado amplamente entre produtores de cana-de-açúcar, sugere-se a manutenção do método, que mesmo determinado a partir de padrões de distribuição dos comprimentos de falha, coincide com o efeito compensatório das variedades modernas. Ao fundamento do método adiciona-se, para fins gerenciais, que a perda de produção causada por uma falha deve ser contabilizada a partir 0,48 m. Por exemplo, o prejuízo de uma falha com comprimento de 0,80 m é igual à produtividade esperada em 0,32 m de linha cultivada.

O efeito compensatório descoberto pode ser explicado pela maior quantidade de colmos em ZN1 no final do ciclo, pois este estava exposto a maior luminosidade, e a luminosidade ativa gemas vegetativas basais e favorece o perfilhamento (TOPPA et al., 2010). O perfilhamento, inferior em ZN2 nas avaliações que ocorreram aos 60 e 90 DAC, indica redução do perfilhamento em plantas vizinhas a soqueiras mais vigorosas devido ao sombreamento causado por estas (BEZUIDENHOUT et al., 2003). Por isso, aos 90 DAC, a soqueira presente em ZN3, foi menos sombreada por ZN2, e continuou perfilhando, apresentando em média, 0,83 colmos a mais.

Apesar de aos 90 DAC ZN3 apresentar mais perfilhos que ZN2, os perfilhos mais fracos, brotados mais tarde, naturalmente se decompõe e suas estruturas celulares são realocadas em outras partes da planta (VASANTHA et al., 2012), levando a equivalência no perfilhamento de ZN2 e ZN3 aos 180 DAC, fazendo com que ambas zonas amostrais não apresentem efeito compensatório. Este fato fica evidente quando comparamos as produtividades de ZN2 e ZN3 com TC (Figura 2.3).

A altura de plantas e o diâmetro do colmo, que não apresentaram diferenças entre as zonas amostrais, indica que não houve competição intraespecífica por luminosidade durante a fase de crescimento de colmos (NOVOPLANSKY, 2009), portanto, a luminosidade superior em ZN1 favoreceu a soqueira apenas na fase do perfilhamento, estimulando as gemas basais a perfilhar mais, e depois, auxiliando na manutenção de tais perfilhos, o que resultou no efeito compensatório.

Como o fator de compensação das plantas em ZN1 não responde ao crescimento das falhas, independentemente do tamanho da falha o efeito compensatório será o mesmo. Assim, um canavial com 50% de falhas de, em média, 0,50 m, não deve apresentar redução significativa na produtividade, enquanto um canavial com 5% de falhas de 1,50 m apresentará, pois, quanto maior o tamanho médio da falha, menor seu percentual compensado por ZN1. Portanto, para ser possível estimar perda na produção de um talhão de acordo com o percentual de falhas que este contém, além de validar a relação de compensação de falhas apresentada por STOLF (1986; 1991), é preciso conhecer o tamanho médio das falhas (TM) em canaviais nos perfis atuais de produção.

2.5.1 Relação perdas-falhas

A relação entre perda de produção e percentual de falhas faz parte da metodologia de STOLF (1986). Ele estima que a perda relativa de produtividade em um canavial em função do percentual de falhas é de 0,38:1 em cana planta, e 0,32:1 em cana-soca.

Para testar essa afirmação, cinco mapas de falhas foram selecionados, apresentando uma média geral de falhas de 25%, dos quais foi levantado o TM de cada um dos mapas de falhas. Se não houvesse efeito compensatório, o percentual de perda de produção devido às falhas seria igual ao percentual de falhas. Porém, o efeito existe, por isso, do TM de cada mapa de falhas amostrado subtraiu-se o fator de compensação de ZN1 (0,48 m).

Os resultados mostraram que há baixa variação entre as perdas estimadas nos mapas utilizados, pois o TM é semelhante em todos eles (Figura 2.4). Portanto, pode-se utilizar a média relação perdas – falhas apresentada na discussão adiante, que foi 0,62:1, e que nos diz que, a cada 10% de falhas em um canavial, há redução de 6,2% na produção do campo.

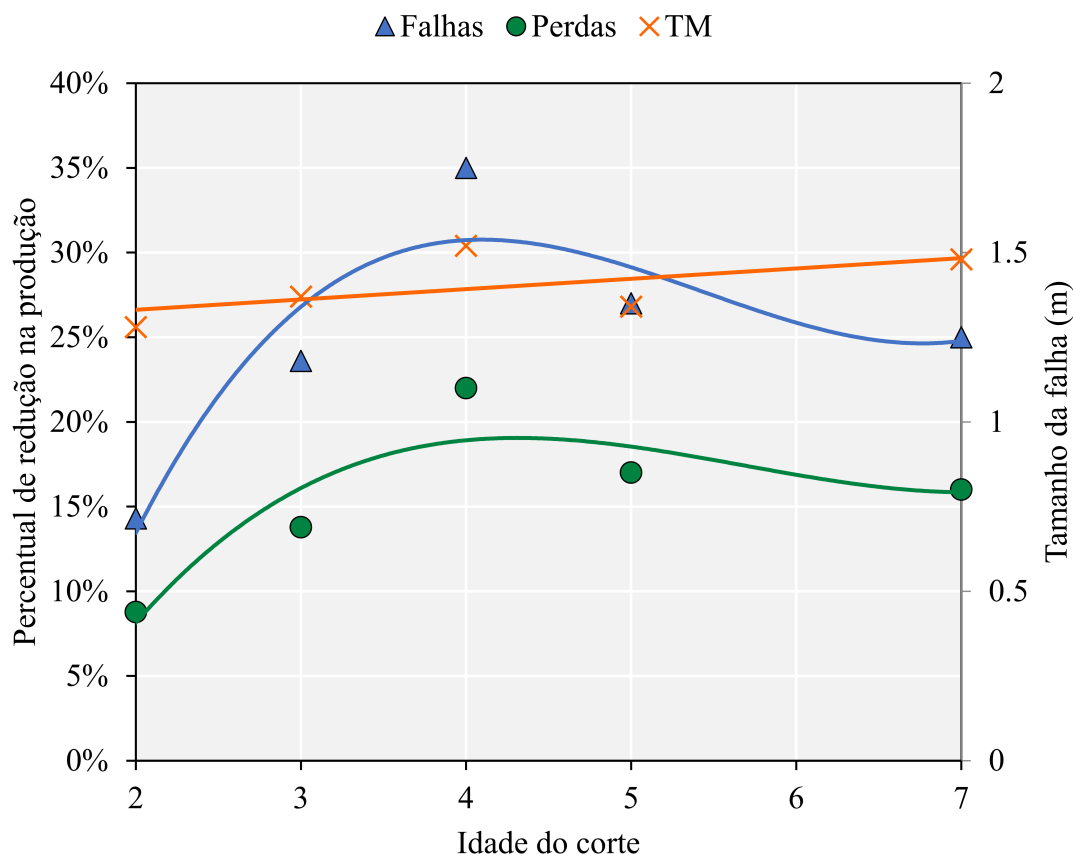


Figura 2.4: Relação entre percentual de redução na produção devido a falhas, e o percentual de falhas em soqueiras do 2º ao 7º corte.

A relação perda – falha obtida neste trabalho se diferiu das apresentadas por STOLF (1986-1991), que em seu trabalho considerou o TM de uma área experimental, pouco mecanizada quando comparada com as áreas comerciais de hoje, cujas falhas ocorrem devido a fatores naturais e envelhecimento das soqueiras (HEERDEN et al., 2010), apresentando menor TM.

Os mapas usados para relacionar percentuais de falhas com perdas representam áreas comerciais altamente mecanizadas, que representam a realidade cujos canaviais estão sujeitos atualmente (GILIO; MORAES, 2016). Tal nível de mecanização causa falhas de rebrota nas soqueiras graças ao atropelamento das máquinas (OTTO et al., 2011; SOUZA et al., 2012; PAULA; MOLIN, 2013).

Falhas características nos canaviais atualmente apresentam maior TM. O TM de um canavial com 15% de falhas, mapeado por STOLF (1986) na década de 80 era de 0,71 m, enquanto as falhas mapeadas na segunda soqueira do conjunto de dados (com percentual de 14,3%) possuem TM = 1,28 m, um crescimento de cerca de 80% no TM.

Devido à diferença no TM, o método de Stolf estima que um canavial com 15% de falhas perde 4,8% de produção, enquanto estes resultados estimaram perdas de

8,77% em um canavial com 14,3% de falhas.

Se no canavial de segundo corte que foi mapeado, e apresentou 14,3% de falhas, o TM fosse de 0,71 m (ao invés de 1,28 m), a relação perdas – falhas obtida aplicando o fator de compensação de ZN1 ($TM - 0,48$, ou seja, $0,71 - 0,48$), seria 0,32:1, valor similar ao predito pelo método de Stolf. Nessa mesma condição, a redução na produção seria 4,62%.

Isso suporta a teoria de que, por meios diferentes, o método de Stolf baseia-se em um fator de compensação muito parecido com o fator de compensação de ZN1, mesmo com cultivares diferentes, indicando que, após décadas de evolução nos materiais implantados, o efeito compensatório não aumentou nas variedades de cana-de-açúcar.

No entanto, a calibração do método de Stolf para estimar perdas de produção em função do percentual de falhas da lavoura não é capaz de representar as condições atuais de cultivo devido ao aumento do TM. Observando a frequência de ocorrência de falhas de cada TM em diferentes cortes (Figura 2.5), nota-se que o TM nos canaviais modernos além de mais altos, variam pouco em relação com suas idades. Por isso, independente da idade do canavial, sugerimos adotar a relação perdas – falhas 0,62:1 para fins gerenciais que venham a embasar decisões estratégicas de manejo.

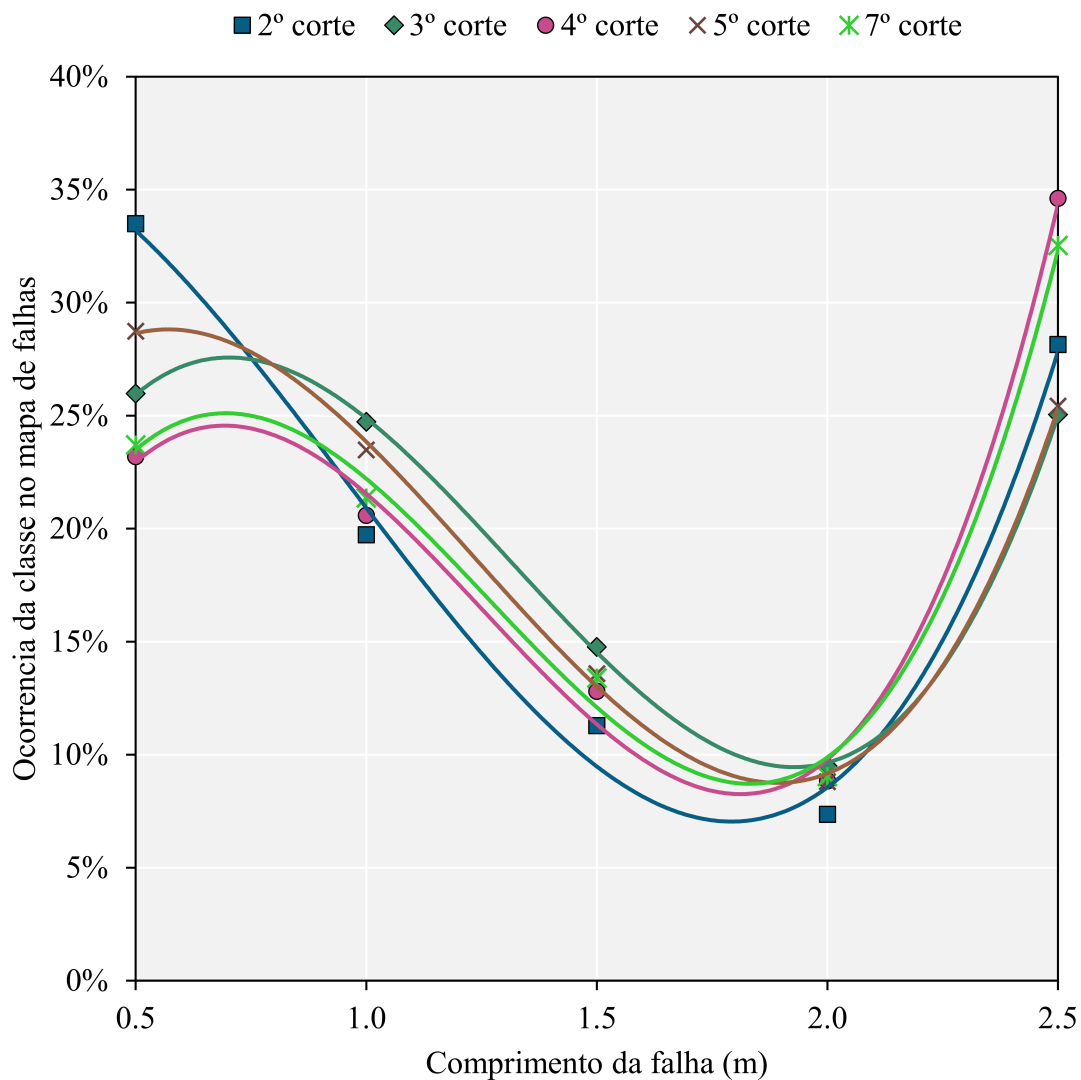


Figura 2.5: Ocorrência das classes de comprimento de falhas nos mapas de falhas analisados.

2.5.2 Redução de perdas na produção

Com os fatos anteriormente apresentados fica claro que há dois caminhos para reduzir as perdas de produção nos espaços falhos: a redução do percentual de falhas e a redução do tamanho médio das falhas. Na tabela 2.3 é possível observar o percentual de perdas em função do percentual de falhas e de seu tamanho médio.

Tabela 2.3: Perda média de produtividade dos canaviais sob diferentes percentuais e tamanhos médios de falhas.

Falhas	Tamanho médio da falha					
	0.5	0.71	0.75	1	1.25	1.28
5%	0.20%	1.62%	1.80%	2.60%	3.08%	3.13%
10%	0.40%	3.24%	3.60%	5.20%	6.16%	6.25%
15%	0.60%	4.86%	5.40%	7.80%	9.24%	9.38%
20%	0.80%	6.48%	7.20%	10.40%	12.32%	12.50%
25%	1.00%	8.10%	9.00%	13.00%	15.40%	15.63%

Considerando a produção média de 76 toneladas por hectare (CONAB, 2020), e a média de falhas encontradas ao longo dos cortes (25%), a produtividade média nacional em canavial sem falhas seria 90,52 toneladas de cana-de-açúcar por hectare. Todavia, sabe-se que não é possível a ausência total de falhas nas lavouras, mas é possível reduzir o seu percentual e o seu comprimento médio, o que levaria a produtividade média dos canaviais aos valores descritos na tabela 2.4.

Tabela 2.4: Produtividade média dos canaviais brasileiro, de acordo com CONAB (2020), sob diferentes percentuais e tamanhos médios de falhas.

Falhas	Tamanho médio da falha					
	0.5	0.71	0.75	1	1.25	1.28
5%	90.34	89.05	88.89	88.17	87.73	87.69
10%	90.16	87.59	87.26	85.81	84.94	84.86
15%	89.98	86.12	85.63	83.46	82.16	82.03
20%	89.80	84.66	84.00	81.11	79.37	79.21
25%	89.61	83.19	82.37	78.75	76.58	76.38

Reduzir o tamanho médio das falhas em 0,28 m, poderia trazer ganhos de até 2,38 toneladas por hectare. Considerando a área total colhida (CONAB, 2020), a produção seria 24,3 milhões de toneladas superior, aumento de aproximadamente 3,1% frente a expectativa atual de produção (ATLASBIG, 2021).

2.6 Conclusões

Existe um fator de compensação atribuído às plantas próximas às falhas por conta da maior luminosidade disponível, que não muda com o tamanho da falha, e garante que falhas de até 0,48 m não tragam prejuízos à produção da lavoura de cana-de-açúcar.

Graças à proximidade entre o fator de compensação (0,48 m), a metodologia atualmente utilizada, que classifica como falha trechos vazios maiores que 0,50 m pode continuar vigente nos canaviais.

Devido ao crescimento do tamanho médio de falhas nos canaviais modernos, sugere-se alterar o método de Stolf, no trecho que descreve a relação entre perdas de produção e percentual de falhas, o valor de 0,32:1 para 0,62:1, adaptando-o à condições de cultivo atuais.

Para uso futuro, quanto maior o tamanho médio de falhas (TM), maior a relação entre perdas de produção e percentual de falhas, por isso, caso o avanço tecnológico leve à mudanças no TM, a relação entre perdas de produção e percentual de falhas deverá ser recalculada.

2.7 Referências

BEZUIDENHOUT, C.; O'LEARY, G.; SINGELS, A.; BAJIC, V. A process-based model to simulate changes in tiller density and light interception of sugarcane crops. **Agricultural Systems**, Elsevier, v. 76, n. 2, p. 589–599, 2003.

BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; SCALA, N. L. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agro-nomy for Sustainable Development**, Springer, v. 38, n. 2, p. 1–23, 2018.

CONAB. ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA V.6 - SAFRA 2019/20 - N.4 - Quarto levantamento | ABRIL 2020, **Conab - Safra Brasileira de Cana-de-açúcar**. 2020. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/31590_6cfbbc41aa04783c69113c50fa499cba. Acesso em: 13 jul. 2021.

GILIO, L.; MORAES, M. A. F. D. de. Sugarcane industry's socioeconomic impact in São Paulo, Brazil: A spatial dynamic panel approach. **Energy Economics**, Elsevier, v. 58, p. 27–37, 2016.

HEERDEN, P. D. R. V.; DONALDSON, R. A.; WATT, D. A.; SINGELS, A. Biomass accumulation in sugarcane: unravelling the factors underpinning reduced growth phenomena. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 11, p. 2877–2887, jun. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jxb/erq144>. Acesso em: 12 jul. 2021.

IEA. **Instituto de Economia Agrícola (IEA)**. 2021. Disponível em: <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=15931>. Acesso em: 13 jul. 2021.

JUNIOR, R. C. B.; LANDELL, M. A.; SILVA, D.; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, T.; JÚNIOR, J. T.; SILVA, V.; ANJOS, I. Censo varietal IAC de cana-de-açúcar no Brasil-safra 2017/18 e na região centro-sul-safra 2018/19. **Campinas: Instituto Agrônômico**, 2019.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. **Wall-map 150cmx200cm**, p. 91–102, 1928.

NOVOPLANSKY, A. Picking battles wisely: plant behaviour under competition. **Plant, cell & environment**, Wiley Online Library, v. 32, n. 6, p. 726–741, 2009.

OTTO, R.; SILVA, A.; FRANCO, H.; OLIVEIRA, E.; TRIVELIN, P. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and tillage research**, Elsevier, v. 117, p. 201–210, 2011.

PAULA, V. R.; MOLIN, J. P. Assessing damage caused by accidental vehicle traffic on sugarcane ratoon. **Applied Engineering in Agriculture**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 29, n. 2, p. 161–169, 2013.

ROSSI, M. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. **São Paulo: Instituto Florestal**, v. 1, p. 118, 2017.

SANTOS, M. A. L.; SILVA, S.; ZOCOLER, J. L.; TEODORO, I.; NETO, J. D. Avaliação de falhas na brotação da cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica. **M. A. L.**, v. 9, n. 4, p. 6, 2013.

SILVA, G. J. da; BERG, E. C.; CALIJURI, M. L.; SANTOS, V. J. dos; LORENTZ, J. F.; ALVES, S. do C. Aptitude of areas planned for sugarcane cultivation expansion in the state of São Paulo, Brazil: a study based on climate change effects. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Elsevier, v. 305, p. 107164, 2021.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; ARAÚJO, F. S.; BARBOSA, R. S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa agropecuária brasileira**, SciELO Brasil, v. 47, p. 603–612, 2012.

SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; LIMA, C. C.; PEREIRA, D. M. G.; LIMA, M. E.; SOUSA, A. C. M.; SOUZA, G. S. et al. Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, SciELO Brasil, v. 50, p. 322–332, 2015.

STOLF, R. Methodology for gap evaluation on sugarcane lines. **Methodology for gap evaluation on sugarcane lines**, v. 4, p. 12–20, 1986.

STOLF, R. Índice de falhas segundo o método de STOLF: correlação com o rendimento agrícola em soqueiras de cana-de-açúcar. v. 11, p. 12–16, 1991.

TAYT'SOHN, F. C. O.; NUNES, A. M.; JUNIOR, A. O. P. Assessing sugarcane expansion to ethanol production under climate change scenarios in Paranaíba river basin–Brazil. **Biomass and Bioenergy**, Elsevier, v. 119, p. 436–445, 2018.

TOPPA, E. V. B.; JADOSKI, C. J.; JULIANETTI, A.; HULSHOF, T.; ONO, E. O. Physiology development in the vegetative stage of sugarcane. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 3, n. 2, p. 169–186, 2010, number: 2. Disponível em: <<https://revistas.unicentro.br/index.php/repaa/article/view/1064>>. Acesso em: 14 jul. 2021.

VASANTHA, S.; SHEKINAH, D. E.; GUPTA, C.; RAKKIYAPPAN, P. Tiller production, regulation and senescence in sugarcane (*Saccharum species hybrid*) genotypes. **Sugar Tech**, Springer, v. 14, n. 2, p. 156–160, 2012.

CAPÍTULO 3 – É necessário aplicar fertilizantes sobre as falhas na cana-de-açúcar?

3.1 Resumo

A cana-de-açúcar é uma cultura de destaque no Brasil e, devido ao crescimento da demanda por biocombustíveis sua área cultivada aumentou 1,9% na safra 2020/2021, tornando cada vez mais importante adotar técnicas que elevem a sustentabilidade da sua produção. Para isso, objetivou-se avaliar os efeitos da interrupção da aplicação de fertilizantes nas falhas de rebrota dos canaviais quanto ao desempenho agrônomo das plantas e sustentabilidade da operação de cultivo. O estudo foi realizado em área comercial de cana-de-açúcar em Descalvado, no estado de São Paulo, Brasil. Foram avaliados os efeitos da adubação em função de comprimentos de falha por meio de experimentos em esquema fatorial 2x3, com e sem aplicação de fertilizantes nas falhas. As plantas foram analisadas em 3 pontos de amostragem. Para explorar os efeitos econômicos da adubação das falhas, mapeou-se cinco canaviais na região do experimento, gerando estatística à cerca dos índices de falhas que ocorrem nas lavouras. Os resultados evidenciaram que a adubação não influenciou na produtividade das plantas próximas às falhas, portanto, os fertilizantes aplicados poderiam ser economizados. Em média, o custo com a aplicação de fertilizante sobre as falhas é de R\$ 215,00 por hectare em cada adubação de cobertura de soqueiras, gerando anualmente R\$ 1,45 bilhões em prejuízo aos produtores brasileiros.

Palavras-chave: adubação localizada, nitrogênio, potássio, sustentabilidade.

3.2 Introdução

No mundo são cultivados 26 milhões de hectares de cana-de-açúcar, sendo o Brasil maior produtor da cultura (FAO, 2020), respondendo por cerca de 30% da área cultivada (BORDONAL et al., 2018; CONAB, 2020). A área cultivada aumentou 1,9% na safra 2020/2021, devido a demanda crescente de biocombustíveis (BORDONAL et al., 2018). Por essa razão, a cultura possui importância socioeconômica como fonte de emprego e renda em muitos municípios do país (OLIVEIRA et al., 2020), especialmente no estado de São Paulo. O estado de São Paulo é considerado o maior produtor nacional de cana-de-açúcar com 60% da área cultivada no país (IEA, 2021). A cultura é uma das principais atividades praticadas no agronegócio paulista, representando 36% do PIB do setor (TAYT'SOHN; NUNES; JUNIOR, 2018; SILVA et al., 2021).

Mesmo com expansão da área cultivada, é preciso elevar a produtividade da cultura por meio de técnicas de cultivo, como por exemplo, a fertilização das soqueiras, onde empregam-se principalmente fontes de nitrogênio (N) e potássio (K). O N e o K contribuem com brotação, perfilhamento, crescimento do colmo e formação de açúcares (NETO et al., 2006; ERNANI; SANGOI; RAMPAZZO, 2002; MALAVOLTA, 1994; VITTI et al., 2002) nas soqueiras de cana-de-açúcar, elevando a sua produtividade. No entanto o uso ineficiente destes insumos pode ser prejudicial ao meio ambiente (ZAHOOR et al., 2014). Uma das possíveis causas da ineficiência na fertilização das soqueiras se deve as falhas, que mesmo sem a presença de plantas produtivas recebem fertilizantes. As falhas nos canaviais são trechos na linha de cultivo maiores que 0,50 m não ocupadas por cana-de-açúcar (STOLF, 1986). Na implantação do canavial, as falhas são causadas por danos às gemas durante o processo de distribuição de mudas durante o plantio. Após a operação de colheita, a rebrota pode ser prejudicada pelo atropelamento da soqueira durante tratos culturais ou na própria operação de colheita (SANTOS et al., 2013).

De acordo com STOLF (1986), as plantas vizinhas às falhas exercem efeito compensatório da produtividade perdida, portanto, a aplicação de fertilizantes como N e K sobre as falhas pode significar fonte extra de nutrientes para auxiliar na maior produção das plantas vizinhas, pois tais nutrientes possuem mobilidade no solo, o que os permite alcançar o sistema radicular de plantas próximas às extremidades das falhas (ERNANI; SANGOI; RAMPAZZO, 2002; NEVES; ERNANI; SIMONETE, 2009). No entanto, outros fatores como a maior luminosidade interceptada pelas plantas vizinhas às falhas podem ser responsáveis pelo efeito compensatório (TOPPA et al., 2010), indicando que não seria necessário aplicar N e K sobre as falhas.

Até o momento, há escassez de estudos avaliando a influência do nitrogênio e do potássio aplicado nas falhas e a capacidade compensatória das variedades modernas. Conhecendo tais variantes, será possível estimar o impacto sobre a sustentabilidade do canavial com base nos índices de falhas das lavouras e favorecer a tomada de decisão. Não são conhecidos estudos que tenham avaliado os reais índices de falhas presentes nos canaviais, já que estes tendem a variar principalmente por conta dos manejos mecanizados empregados em cada fazenda.

Para manter a lucratividade do cultivo de cana-de-açúcar e atender a lei nº 11.241/2002 do estado de São Paulo, que proíbe a queimada dos canaviais antes da colheita, impedindo o trabalho manual em grande escala, foi necessário adotar práticas mecanizadas nas últimas décadas (GILIO; MORAES, 2016). O uso inadequado da mecanização pode causar compactação do solo e danos às soqueiras, devido ao atropelamento das plantas pelas máquinas agrícolas (OTTO et al., 2011; PAULA; MOLIN, 2013; SOUZA et al., 2012), levando a índices variáveis de falhas.

Conhecendo os índices de falhas e a resposta da cana-de-açúcar à fertilizantes aplicados sobre as falhas nas soqueiras, será possível calcular impactos econômicos da aplicação de fertilizantes nas falhas. Caso estes sejam desnecessários, tecnologias de agricultura de precisão poderão prover a interrupção da aplicação de fertilizantes de forma localizada, elevando a sustentabilidade do cultivo. Com base nesse contexto o presente estudo objetivou avaliar os efeitos da interrupção da adubação nas falhas sobre o desempenho agrônômico das plantas em suas extremidades, e sobre a rentabilidade do canavial implantado com a variedade RB86-7515.

3.3 Material e Métodos

3.3.1 Área experimental

O experimento foi conduzido em canavial com a variedade RB86-7515, que apresenta alta produtividade, é recomendada para ambientes de produção C e D, apresenta maturação média, alto teor de sacarose, baixa isoporização, maior sensibilidade à mecanização, e é uma das variedades mais plantadas nos últimos anos (JUNIOR et al., 2019). O canavial foi implantado em 14/12/2017, com linhas espaçadas a 1,40 metros. O canavial foi instalado em área de produção próxima à Descalvado, São Paulo, Brasil (W 47°36' S 21°54', altitude de 679 m), (Figura 3.1).

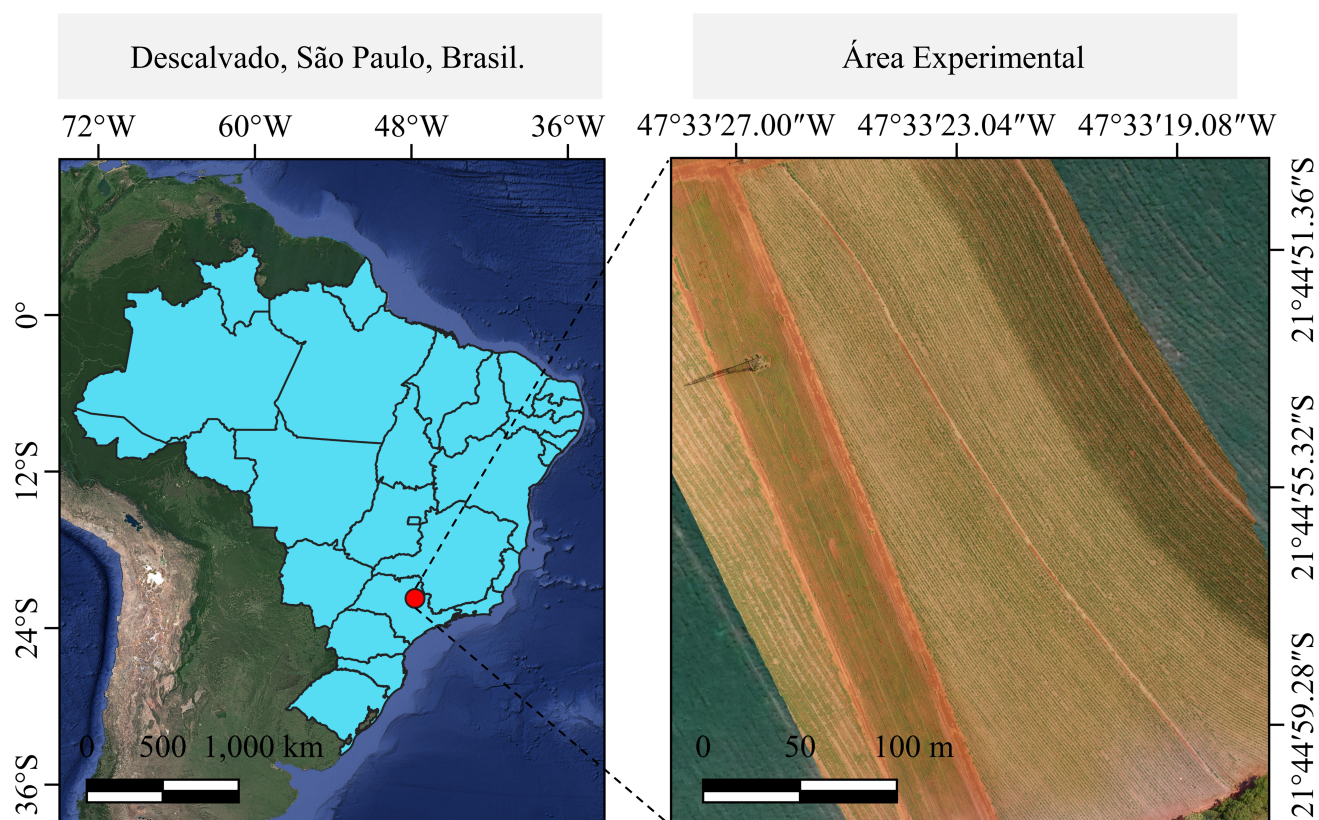


Figura 3.1: Localização da área experimental.

3.3.2 Delineamento experimental

Foram comparadas duas técnicas de adubação de cobertura do canavial. Na primeira as falhas receberam fertilizantes como o restante do canavial (CON) e na segunda técnica de manejo (CAS), as falhas não receberam fertilizantes em cobertura, simulando o uso de um sistema de corte automático de seções da aplicação sobre as falhas (Figura 3.2).

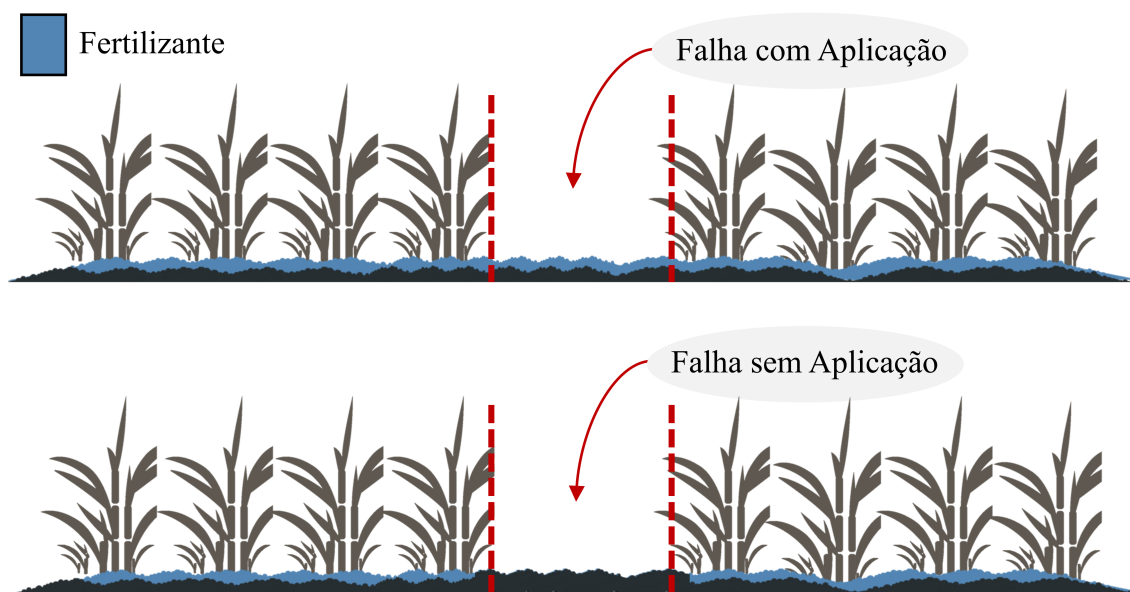


Figura 3.2: Ilustração do uso de fertilizante sob as áreas com falhas nas linhas de cana-de-açúcar.

Para comparar as técnicas de adubação, avaliando se estas poderiam apresentar efeito nas plantas de acordo com a sua distância em relação às extremidades das falhas, três zonas amostrais vizinhas às falhas (ZN1 = 0,00 à 0,50 m em relação à falha; ZN2 = 0,51 à 1,00 m em relação à falha e; ZN3 1,01 à 1,50 m em relação à falha) foram delimitadas. As três zonas amostrais se repetiam em ambos os lados das falhas para aumentar a confiabilidade dos dados, e foram consideradas réplicas durante as avaliações (Figura 3.3). O experimento se repetiu em cinco comprimentos de falhas (0,50 m, 1,00 m, 1,50 m, 2,00 m e 2,50 m), visando determinar em quais tamanhos de falhas o tratamento CAS não causa efeito negativo no desempenho da cana-de-açúcar.

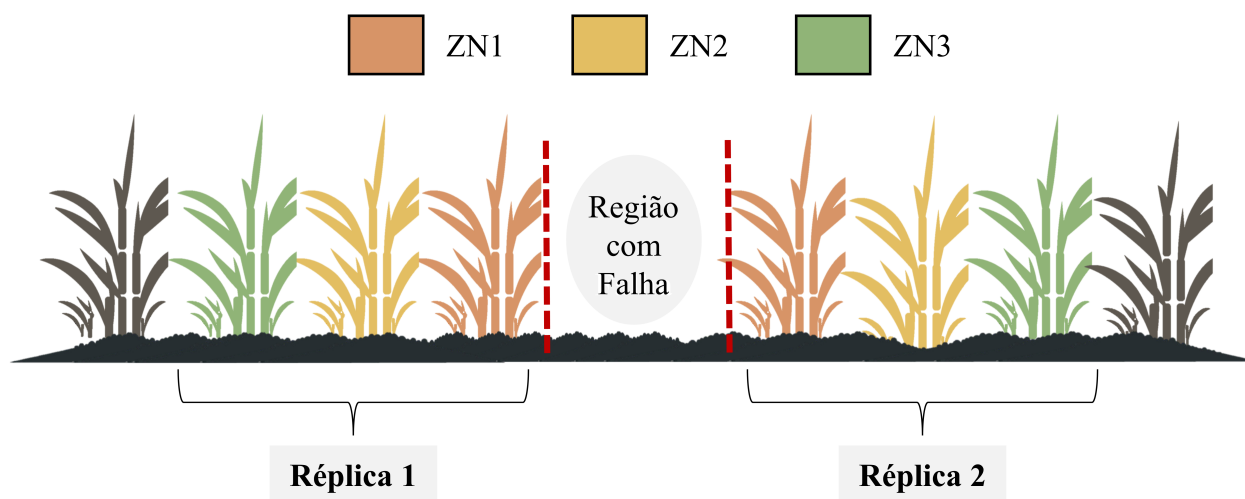


Figura 3.3: Disposição das zonas amostrais perante as falhas.

3.3.3 Instalação do experimento

Foram delimitados 5 blocos na área experimental com homogeneidade interna. Em cada um dos blocos, 10 parcelas foram posicionadas contendo 3 linhas da cultura com 10 m de comprimento. No centro de cada parcela, foram provocadas falhas, alcançando os comprimentos descritos no delineamento. Assim, ocorreu duas falhas de cada comprimento em cada bloco. Cada uma das falhas foi submetida a uma das técnicas de adubação (CAS ou CON).

A implantação das técnicas de adubação estudadas ocorreu no 38º dia após a primeira colheita. Aplicou-se fertilizante na forma líquida na formulação (NPK) 12-03-15 no volume de 704 L ha^{-1} , combinada aos inseticidas Bifentrina na concentração de 400 g L^{-1} na dosagem de $0,16 \text{ L}$ e Fipronil na concentração de 600 g L^{-1} na dosagem de $0,4 \text{ L ha}^{-1}$, posicionado a $0,05 \text{ m}$ de profundidade no centro da soqueira usando cortador de soqueiras de 3 linhas, com dois tanques para produto, sendo um para inseticida e outro para o fertilizante. Nas parcelas em que as falhas não deveriam receber fertilizantes, a adubação foi realizada até o último broto de cana-de-açúcar na extremidade das falhas. Para desligar a aplicação sobre as falhas, instalou-se no cortador de soqueira uma válvula solenoide de acionamento elétrico 12 V , de 2 vias com diâmetro de $\frac{1}{2}$ " antes da saída do jato dirigido. O acionamento foi realizado manualmente por meio de um interruptor de energia instalado entre a bateria e a válvula solenoide. Ao sobrepor a falha nos tratamentos CAS, o interruptor era pressionado por um técnico que acompanhou a aplicação ao lado do equipamento. Ao final destas falhas, a aplicação era retomada.

3.3.4 Avaliações

Foram realizadas cinco avaliações durante o experimento. As técnicas de adubação estudadas poderiam trazer comportamentos diferentes nas plantas de acordo com a sua distância em relação às falhas, portanto, nas avaliações, amostras foram coletadas nas zonas amostrais descritas na Figura 3.3.

3.3.4.1 Avaliação 1 (30 dias após a colheita)

Foi realizada a contagem de perfilhos e a medição das alturas de plantas em todas as zonas amostrais. Foram contabilizados os perfilhos com mais de 0,10 m de altura (do solo até o ápice) manualmente, utilizando gabaritos para delimitar ZN1, ZN2 e ZN3. As réplicas em ambos os lados das parcelas compuseram uma média, que foi multiplicada por 2 para representar a quantidade de perfilhos em 1,00 metros de linha cultivada. Para aferir a altura de plantas usou-se uma trena com graduação métrica posicionada entre a superfície do solo e ápice da folha mais alta da planta mais alta da zona amostral (Figura 3.4a).

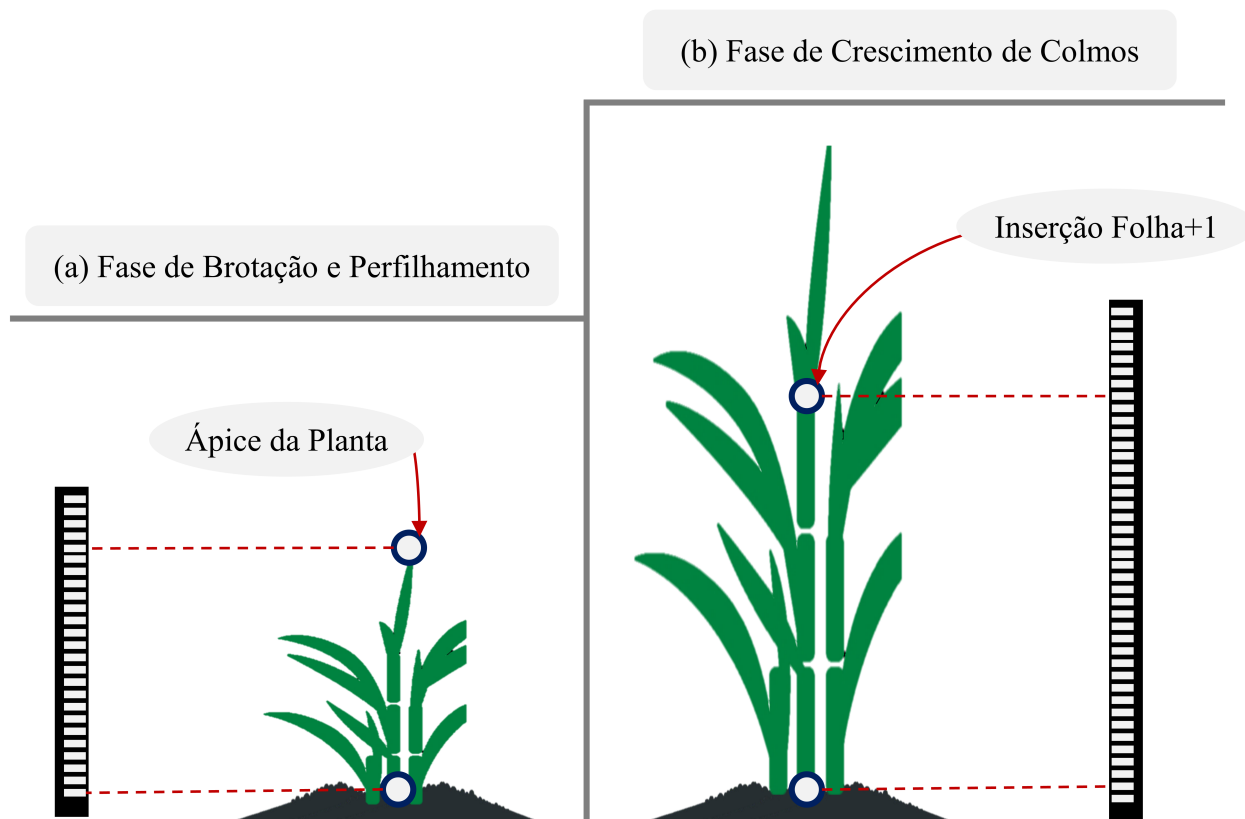


Figura 3.4: Métodos de medição de altura nas fases de brotação e perfilhamento (a) e na fase de crescimento de colmos (b).

Por ter sido realizada antes da implantação dos tratamentos, esta avaliação restringe-se a avaliar a casualização das parcelas e garantir igualdade inicial entre os tratamentos.

3.3.4.2 Avaliação 2 e 3 (60 e 90 dias após a colheita)

Foi executada a contagem de perfilhos dentro de cada zona amostral e medição das alturas de plantas utilizando os mesmos métodos da primeira avaliação. Realizadas após a implantação dos tratamentos, estas avaliações objetivaram estudar os efeitos da aplicação de fertilizantes sobre as falhas na fase de perfilhamento da cana-de-açúcar.

3.3.4.3 Avaliação 4 (180 dias após a colheita)

Avaliou-se o número de colmos, a altura das plantas e o diâmetro dos colmos em todas as zonas amostrais. O número de colmos manteve o método usado inicialmente, no entanto, para se adequar ao estágio em que o canavial se situava, a avaliação a altura de plantas passou a ser contabilizada como altura do colmo, aferindo-se a altura entre o solo e a inserção da primeira folha com aurícula visível, conhecida como folha +1 (Figura 3.4b). Para aferir o diâmetro de colmos foram realizadas 3 leituras por zona amostral, posicionando um paquímetro digital com precisão de $\pm 0,01$ mm no terço médio dos colmos. A avaliação objetivou estudar os efeitos da aplicação de fertilizantes sobre as falhas na fase de crescimento da cana-de-açúcar.

3.3.4.4 Avaliação 5 (Colheita)

Foram avaliados massa dos colmos produzidos e os parâmetros tecnológicos dos colmos, contabilizando BRIX (%), Fibra (%), Pureza (%), Pol da cana (%), Açúcares redutores (A.R. %) e Açúcares totais recuperáveis (ATR, em kg tonelada⁻¹) de acordo com metodologia de Fernandes (2003) em cada uma das zonas amostrais. As zonas amostrais foram colhidas manualmente. Os colmos foram limpos, retirando ponteira e folhas. A massa dos colmos produzidos foi aferida usando uma balança com precisão de $\pm 0,001$ kg. O objetivo foi estudar impactos das técnicas de adubação sobre a produtividade e a qualidade da cana-de-açúcar produzida.

3.3.5 Parâmetros tecnológicos

Parte dos colmos colhidos nas zonas amostrais foram submetidos a análises conforme metodologia de Fernandes (2003). As análises foram ordenadas por bloco, sendo que todos foram analisados em um intervalo de 12 horas.

3.3.6 Metodologia adotada na caracterização das falhas dos canaviais

Para calcular o impacto econômico da interrupção da adubação sobre as falhas, foram selecionadas cinco áreas de produção para mapear as falhas de rebrota de soqueiras (Tabela 3.1). As áreas selecionadas apresentavam as mesmas características tecnológicas empregadas no restante das áreas produzidas na Usina, evitando divergências entre os tratos praticados.

Tabela 3.1: Áreas experimentais utilizadas no mapeamento de falhas em soqueiras em função da idade do canavial.

Nome do talhão	Idade do Corte	Área (ha ⁻¹)	Falhas (%)	Variedade
Talhão 03	2 ^o corte	7,89	14,31	CTC-2
Talhão 20	3 ^o corte	9,81	23,61	RB59-0296
Talhão 18	4 ^o corte	8,66	35,27	CTC-2
Talhão 08	5 ^o corte	28,56	27,08	CTC-2
Talhão 07	7 ^o corte	18,37	25,09	CTC-2

A aquisição das imagens foi realizado com um Drone Phantom 4 com sensor 1” CMOS Effective, com 20 megapixel de resolução, para aquisição das imagens aéreas em altura de 80 metros, com sobreposição frontal de 70% e sobreposição lateral de 75% entre cada imagem adquirida. No momento do voo as plantas mediam entre 0,60 e 0,90 m de altura.

Após a confecção do ortomosaico, o mapeamento das falhas de plantio foi realizado pelo software computacional de identificação de falhas Inforrow, que calcula o índice de falhas de um talhão segundo a metodologia proposta por STOLF (1986). Pode-se observar um exemplo da demarcação das falhas pelo algoritmo de identificação na Figura 3.5.

As falhas mapeadas foram classificadas de acordo com seu comprimento em um software de planilhas eletrônicas (0,50 m – 1,00 m, 1,00m – 1,50 m, 1,50 m – 2,00 m, 2,00 m – 2,50 m e > 2,50 m). A ocorrência e a quantidade de falhas foram utilizadas para estimar o impacto causado pelos tratamentos sobre a lucratividade do canavial.

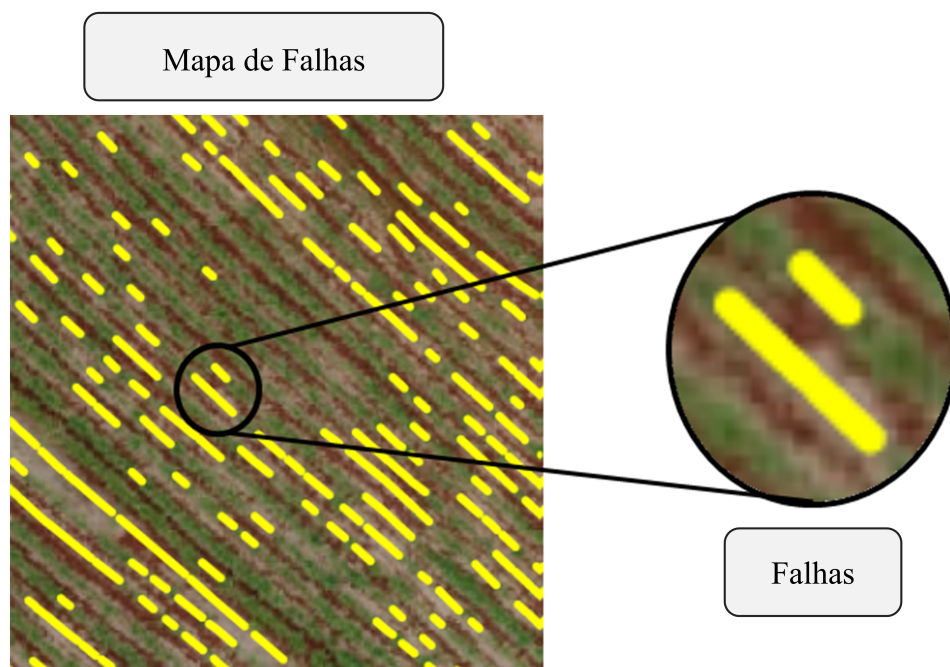


Figura 3.5: Exemplo de demarcação de falhas na linha da cultura.

3.3.7 Análises realizadas

3.3.7.1 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância ($p < 0,05$) e, nos casos em que o F foi significativo, à comparação de médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$)

3.3.7.2 Análise econômica

O custo de aquisição dos fertilizantes aplicados em cobertura sobre as falhas foi obtido em tabelas de custo de produção para pequenos, médios e grandes produtores (SOCICANA, 2019). A tabela utilizada é disponibilizada pelo Socicana, associação dos fornecedores de cana-de-açúcar de Guariba-SP, e toma como base o preço dos insumos entre os meses de outubro e dezembro de 2019, período que ocorreu a adubação de cobertura da área experimental. Os dados econômicos foram relacionados com os mapas de caracterização das áreas da Usina Ipiranga para estimar o valor investido nos fertilizantes aplicados sobre as falhas.

3.4 Resultados

3.4.1 Falhas de 0,5 m

Não houve diferenças na produtividade das plantas vizinhas às falhas de 0,5 m ($P < 0,05$) causadas pela adubação das falhas ou distanciamento entre as plantas e as falhas. No 30º dia todos os tratamentos apresentaram valores equivalentes quanto ao número de perfilhos e altura de plantas. No entanto, no 60º dia, 22 dias após a adubação de cobertura, o perfilhamento foi superior na ZN1 do tratamento CAS, e se manteve superior até o 90º dia, porém passou a sofrer com a mortalidade superior de perfilhos. A mortalidade no tratamento CAS foi de 51% enquanto nos CON foi 30%. No 180º dia não houve diferenças entre os tratamentos CAS e CON. No 60º dia a altura das plantas na ZN1 do tratamento CAS, também foi superior. No entanto, aos 90 dias as diferenças foram extintas.

As falhas de 0,5 a 1,0 m ocorreram em todos os cortes observados, ocupando de 4% a 8% das linhas de plantio (Tabela 3.2). Falhas com este comprimento correspondem a aproximadamente 25% das falhas totais mapeadas, exceto no primeiro corte, onde estas representam 33% das falhas totais.

Considerando o custo dos fertilizantes no período do experimento, que de acordo com SOCICANA (2019) equivale a R\$ 858,00 (referente a aplicação de 500 kg ha⁻¹ da formulação NPK 20-05-20) o valor aplicado sobre as falhas variou de R\$ 41,14 a R\$ 70,14 por hectare (Tabela 3.2). O valor máximo deu-se no 4º corte devido ao maior percentual de falhas, enquanto o valor mínimo estabeleceu-se no 2º corte, com menor percentual.

Tabela 3.2: Custo de aplicação de fertilizantes e ocorrência de falhas com comprimento entre 0,5 m e 1,0 m, conforme SOCICANA (2019), ao longo de sete cortes.*Cotação média do dólar no período: R\$ 4,08.

Métricas	Idade do Corte				
	2º	3º	4º	5º	7º
Percentual de falhas (%)	4,80	6,13	8,17	7,78	5,95
Soma das falhas (m)	2.650	3.866	4.675	7.999	7.429
Custo de aplicação (R\$ ha ⁻¹)	41,14	52,60	70,14	66,76	51,02

3.4.2 Falhas de 1,0 m

A produtividade não foi beneficiada pela adubação das falhas de 1 metro de comprimento. No entanto, o perfilhamento na ZN1 do tratamento CON foi superior no 90º dia, o que não levou a ganhos produtivos, pois entre o 90º e 180º dia, estas zonas amostrais apresentaram maior mortalidade de perfilhos. Enquanto o tratamento CAS apresentou mortalidade de 30% no tratamento CON a mortalidade foi 47%. Aos 180, a altura das plantas no período foi superior no tratamento CAS.

As falhas de 1,00 a 1,50 m ocorreram em todos os canaviais mapeados, ocupando de 2,82% a 7,26% das linhas de plantio (Tabela 3.3). A ocorrência não foi proporcional à idade do canavial, apresentando-se em valores decrescentes entre o 4º e o 7º corte. Falhas neste porte representaram de 19 a 24% das falhas mapeadas.

Com base no investimento feito na adubação de cobertura, o valor aplicado sobre as falhas variou de R\$ 24,22 a R\$ 62,27 por hectare devido a variabilidade nos índices de falhas entre os cortes mapeados (Tabela 3.3). Assim como nas falhas entre 0,50 e 1,00 m de comprimento, o valor máximo deu-se no 4º corte. Já o valor mínimo estabeleceu-se no 2º corte.

Tabela 3.3: Custo de aplicação de fertilizantes e ocorrência de falhas com comprimento entre 1,0 m e 1,5 m, conforme SOCICANA (2019), ao longo de sete cortes.*Cotação média do dólar no período: R\$ 4,08.

Métricas	Idade do Corte				
	2º	3º	4º	5º	7º
Percentual de falhas (%)	2,82	5,84	7,26	6,36	5,36
Soma das falhas (m)	1.560	3.681	4.15	6.559	6.692
Custo de aplicação (R\$ ha ⁻¹)	24,22	50,08	62,27	54,55	45,96

3.4.3 Falhas de 1,5 m

Não houve diferença entre os tratamentos CAS e CON sobre características produtivas da variedade ($p > 0,05$). No entanto, observou-se que plantas na ZN1 produziram 3,20 kg de colmo a mais que as plantas nas demais zonas amostrais devido ao maior perfilhamento estabelecido aos 90 dias, que perdurou até a colheita. Nessa zona amostral, na colheita, identificou-se um acréscimo médio 3 colmos a cada 0,50 m.

Em relação aos aspectos tecnológicos do caldo da cana-de-açúcar, observou-se que aplicar adubo nas falhas aumentou os teores de açúcares redutores (AR) das plantas vizinhas, que fez com que a pureza do caldo obtido dos colmos dos tratamentos onde a falha não foi adubada fosse superior. A alteração não ocasionou diferenças no ATR ($p > 0,05$), por isso, não interferiu no valor pago pelos colmos na usina.

As falhas de 1,50 a 2,00 m ocorreram em todos os cortes mapeados, ocupando de 1,61% a 4,51% das linhas de plantio (Tabela 3.4). Os menores índices dessa classe de falhas ocorreram no 2º corte. As falhas nesse comprimento representaram de 11% a 14% das falhas mapeadas.

O valor aplicado sobre as falhas variou de R\$ 13,86 a R\$ 38,72 por hectare (Tabela 3.4). Assim como nas demais extensões de falhas, o valor máximo deu-se no 4º corte. Já o valor mínimo estabeleceu-se no 2º corte.

Tabela 3.4: Custo de aplicação de fertilizantes e ocorrência de falhas com comprimento entre 1,5 m e 2,0 m, conforme SOCICANA (2019), ao longo de sete cortes.*Cotação média do dólar no período: R\$ 4,08.

Métricas	Idade do Corte				
	2º	3º	4º	5º	7º
Percentual de falhas (%)	1,61	3,49	4,51	3,68	3,36
Soma das falhas (m)	892	2.198	2.581	3.918	4.196
Custo de aplicação (R\$ ha ⁻¹)	13,86	29,91	38,72	31,56	28,82

3.4.4 Falhas de 2,0 m

Como nas falhas de 1,50 m, a adubação não afetou a produtividade ou características biométricas das plantas em suas extremidades ($p > 0,05$). Nestas falhas a adubação também não afetou a qualidade tecnológica dos colmos ($p > 0,05$). A produtividade das plantas em ZN1 foi superior 4,22 kg em relação à ZN3. A zona amostral com maior produtividade atingiu 180 dias com 4 colmos a mais que a zona amostral com menor produtividade.

As falhas de 2,00 a 2,50 m ocorreram em todos os cortes observados, ocupando de 1,05% a 3,11% do canavial (Tabela 3.5). Os menores índices dessas falhas ocorreram no 2º e no 5º corte. As falhas nesse comprimento representaram de 7% a 9 % das falhas mapeadas.

O custo dos fertilizantes aplicados sobre as falhas oscilou entre R\$ 9,04 e R\$ 26,73 por hectare (Tabela 3.5). Assim como nas demais extensões de falhas, o valor máximo deu-se no 4º corte. Já o valor mínimo estabeleceu-se no 2º corte.

Tabela 3.5: Custo de aplicação de fertilizantes e ocorrência de falhas com comprimento entre 2,0 m e 2,5 m, conforme SOCICANA (2019), ao longo de sete cortes.*Cotação média do dólar no período: R\$ 4,08.

Métricas	Idade do Corte				
	2º	3º	4º	5º	7º
Percentual de falhas (%)	1,05	2,24	3,11	2,38	2,27
Soma das falhas (m)	582	1.413	1.781	2.592	2.83
Custo de aplicação (R\$ ha ⁻¹)	9,04	19,23	26,73	20,44	19,44

3.4.5 Falhas de 2,5 m

Adubar as falhas não afetou a produtividade ou características biométricas ou tecnológicas das plantas em suas extremidades ($p > 0,05$). A produtividade na ZN1 foi superior 3,6 kg em relação às plantas na ZN3. Estas também apresentaram maior número de colmos aos 180 dias.

Falhas de comprimento superior a 2,50 m ocorreram em todos os cortes observados, ocupando de 4,03% a 12,21% do canavial (Tabela 3.6). Os menores índices dessa classe de falhas ocorreram no 2º corte. As falhas nesse comprimento representaram de 25% a 34% das falhas mapeadas.

Foi aplicado sobre as falhas de R\$ 31,89 a R\$ 104,73 por hectare de fertilizantes em cobertura (Tabela 3.6). Assim como nas demais extensões de falhas, o valor máximo deu-se no 4º corte. Já o valor mínimo estabeleceu-se no 2º corte.

Tabela 3.6: Custo de aplicação de fertilizantes e ocorrência de falhas com comprimento superior à 2,5 m, conforme SOCICANA (2019), ao longo de sete cortes.*Cotação média do dólar no período: R\$ 4,08.

Métricas	Idade do Corte				
	2º	3º	4º	5º	7º
Percentual de falhas (%)	4,03	5,91	12,21	6,88	8,16
Soma das falhas (m)	2.227	3.729	6.981	7.538	10.197
Custo de aplicação (R\$ ha ⁻¹)	34,57	50,73	104,73	59,06	70,04

3.5 Discussão

3.5.1 Desempenho agrônômico

Adubar as falhas não garantiu produtividade superior às plantas vizinhas, indicando que o fertilizante aplicado pode ser economizado. Isso pode ser explicado pelo fato de que os insumos aplicados nas falhas excederem a dose ótima e as plantas deixam de responder com incrementos à produtividade. Considerando que, a produtividade da cana-de-açúcar não responde linearmente à dose de adubação, alta disponibilidade de fertilizantes tende a reduzir a produtividade da cana-de-açúcar (OTTO; VITTI; LUZ, 2010).

Todavia, há possibilidade de haver reservas de nutrientes sob as falhas, que podem ter sido utilizadas pelas plantas posicionadas nas extremidades dos tratamentos CAS. Estudos afirmam que N pode ser armazenado em rizomas no ciclo anterior da cultura, vindo a contribuir com a brotação e o crescimento das soqueiras subsequentes (MALAVOLTA, 1994; VITTI et al., 2002; ESPIRONELO, 1989; FILHO et al., 1999).

Ambas hipóteses são suportadas pelo comportamento biométrico das plantas vizinhas às falhas. Nas menores falhas (0,50 metros) o perfilhamento foi inferior entre o 60º e 90º dia sob a presença de N e K aplicado nas falhas sob o tratamento CON, pois o montante adicional de nitrogênio garantiu o desenvolvimento dos perfilhos mais velhos, levando-os a bloquear o contato da luminosidade com as gemas basais da soqueira e reduzir brotações tardias. A luminosidade ativa gemas vegetativas basais e favorece o perfilhamento (TOPPA et al., 2010). A liberação de nutrientes armazenados em rizomas de ciclos anteriores, por ser mais lenta, manteve os perfilhos próximos às falhas sobre tratamento CAS permaneceram menos vigorosos por mais tempo, permitindo o contato da luminosidade com as gemas basais e estimulando a brotação tardia. No entanto, os perfilhos brotados entre o 90º e 180º dia foram abortados devido à competição intraespecífica por luz, indicada pela maior altura dos perfilhos a partir do 60º dia. Plantas sombreadas, devido à alta população de perfilhos, tendem a ser mais altas pois entram em competição intraespecífica por luminosidade (NOVOPLANSKY, 2009).

Nas falhas de 1,00 m o comportamento foi contrário, mostrando que o acréscimo na luminosidade, graças à ausência de plantas nas falhas, combinado com a maior disponibilidade de nutrientes proveniente dos fertilizantes aplicados no tratamento CON, estimulou o perfilhamento na ZN1 do tratamento CON. No entanto, a partir dos 90 dias ocorreu maior mortalidade de perfilhos nesse tratamento. A aplicação de fertilizantes na forma líquida sobre as falhas no tratamento CON promoveu liberação imediata de nutrientes para as plantas, elevando o perfilhamento. No entanto, ao atingir o estágio

de crescimento, as soqueiras sofreram com a falta de nutrientes para suprir todos os perfilhos, levando-os à senescência. Os perfilhos mais fracos, brotados mais tarde, se decompõem e suas estruturas celulares são realocadas em outras partes da planta (VASANTHA et al., 2012).

Nas falhas maiores que 1,50 metros, foi mantida a tendência que passou a ser observadas nas falhas de 1,00 metro, onde houve maior perfilhamento na ZN1. O comportamento, no entanto, ocorreu em todos os tratamentos, indicando tendência das plantas nas extremidades das falhas de compensar parcialmente o espaço não ocupado, como observado por STOLF (1991), mesmo sem a adição de fertilizantes nas falhas. O perfilhamento permaneceu superior nas zonas amostrais mais próximas às extremidades das falhas até a colheita, resultando em ganho de produtividade. Esse resultado traz dados atualizados sobre o efeito compensatório da cana-de-açúcar. Portanto, estudos posteriores devem ser realizados analisando em conjunto todas as falhas em condições normais de cultivo, ou seja, sem intervenções na adubação das falhas pois podem causar ruídos nas análises mascarando resultados significativos.

Os parâmetros tecnológicos dos colmos foram afetados negativamente pelo tratamento CON nas falhas de 1,50 m de comprimento, pois os teores de açúcares redutores foram 11% maiores nas falhas adubadas. Açúcares redutores alteram a pureza do caldo da cana-de-açúcar (FERNANDES, 2000). Nas falhas não adubadas, a pureza foi 2,28% superior. Em falhas maiores que 1,50 m não foi observado efeito da adubação em nenhum dos componentes de produção ou parâmetros tecnológicos dos colmos apontando equivalência entre a disponibilidade de nutrientes armazenados em rizomas e aplicados sobre as falhas com a dose ótima demandada pela cana-de-açúcar.

Estudos futuros devem analisar o comportamento das plantas próximas às falhas não adubadas em cortes subsequentes e em outras variedades. No entanto, os resultados trazem informações positivas sobre o comportamento da cana-de-açúcar quando fertilizantes não são aplicados sobre as falhas, apontando a possibilidade de redução no uso de fertilizantes minerais, podendo com isso elevar a sustentabilidade do cultivo da cultura. Aplicações excessivas de fertilizantes minerais são prejudiciais ao meio ambiente (ZAHOR et al., 2014).

Para suprir o crescimento da demanda de fertilizantes minerais para a agricultura, a produção de fertilizantes nitrogenados tem crescido 7,3 milhões de toneladas anualmente (BASSO et al., 2013), causando aumento da concentração de ambiental de N (HOWARTH, 2004), o que leva a acidificação dos recursos hídricos e do solo, lençóis freáticos e superficiais, destruição da camada de ozônio e aumento níveis de gases de efeito estufa devido à emissão de N₂O e perda de biodiversidade em ecossistemas (GALLOWAY; COWLING, 2002).

3.5.2 Ocorrência de falhas

A ocorrência de falhas esteve presente em todos os cortes do canavial, ocupando em média 25% da área cultivada. Considerando o índice médio de falhas encontrado, a aplicação média de N em cobertura equivalente a 100 kg ha^{-1} (SOCICANA, 2019), área cultivada no Brasil equivalente a 8,442 milhões de hectares (CONAB, 2020), com 80% da área cultivada recebendo fertilizantes em cobertura, aproximadamente 168 mil toneladas de N são lançadas sobre as falhas nos canaviais sem retorno produtivo. O mesmo valor pode ser economizado em K.

Observou-se tendência de crescimento dos índices de falhas no envelhecimento da lavoura, chegando a níveis regulares ($> 20\%$) a partir do terceiro corte (STOLF, 1986). No entanto, não é possível prever os índices de falhas considerando apenas a idade do canavial, pois mesmo havendo a padronização do pacote tecnológico usado e as características da lavoura na seleção dos talhões, o talhão 4 apresentou níveis de falhas superiores a corte mais antigos (Figura 3.6) devido a adversidades nos tratos culturais e colheita, assim como de fatores como o clima, ataque de pragas e doenças e menor vigor vegetativo da soqueira (SANTOS et al., 2013; MATSUOKA; STOLF, 2012).

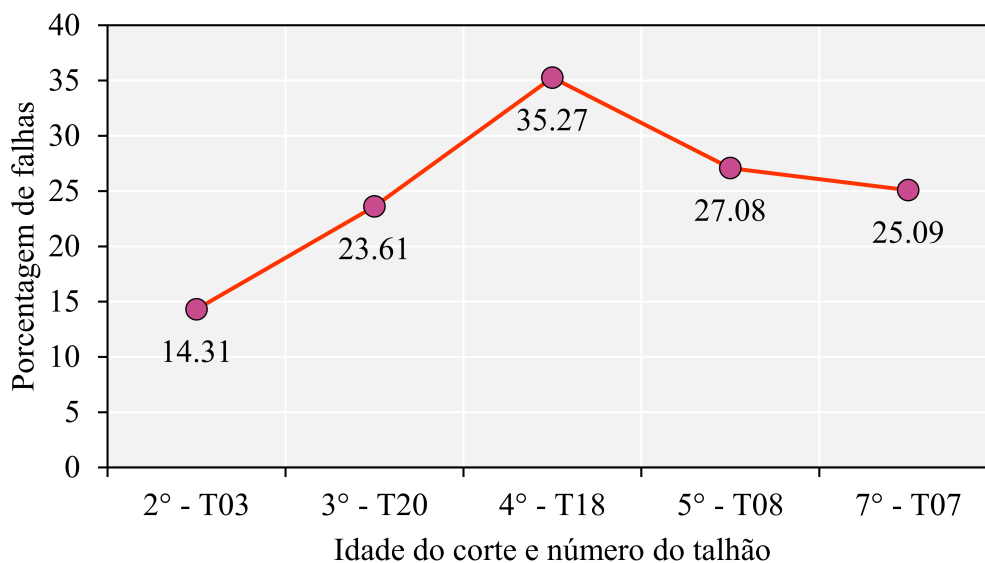


Figura 3.6: Distribuição das falhas em função da idade do canavial.

Observou-se que o comprimento das falhas se repetiu em todos os conjuntos de dados. As falhas de 0,50 metros e as falhas maiores que 2,50 metros ocorrem em maior frequência, seguida pelas falhas 1,00, 1,50 e 2,00 metros respectivamente. O comportamento se justifica pelas falhas de 0,50 metros ocorrerem inicialmente, pois depende da morte de apenas uma soqueira. Já as falhas maiores que 2,50 m ocorreram em grande quantidade, pois, devido ao método adotado na classificação, estas englobam qualquer conjunto de falhas com comprimento superior a 2,50 metros. Com o passar dos cortes soqueiras vizinhas às falhas podem morrer aumentando seu comprimento. Quanto mais velho o canavial maior a quantidade de falhas superiores a 2,50 metros (Figura 3.7).

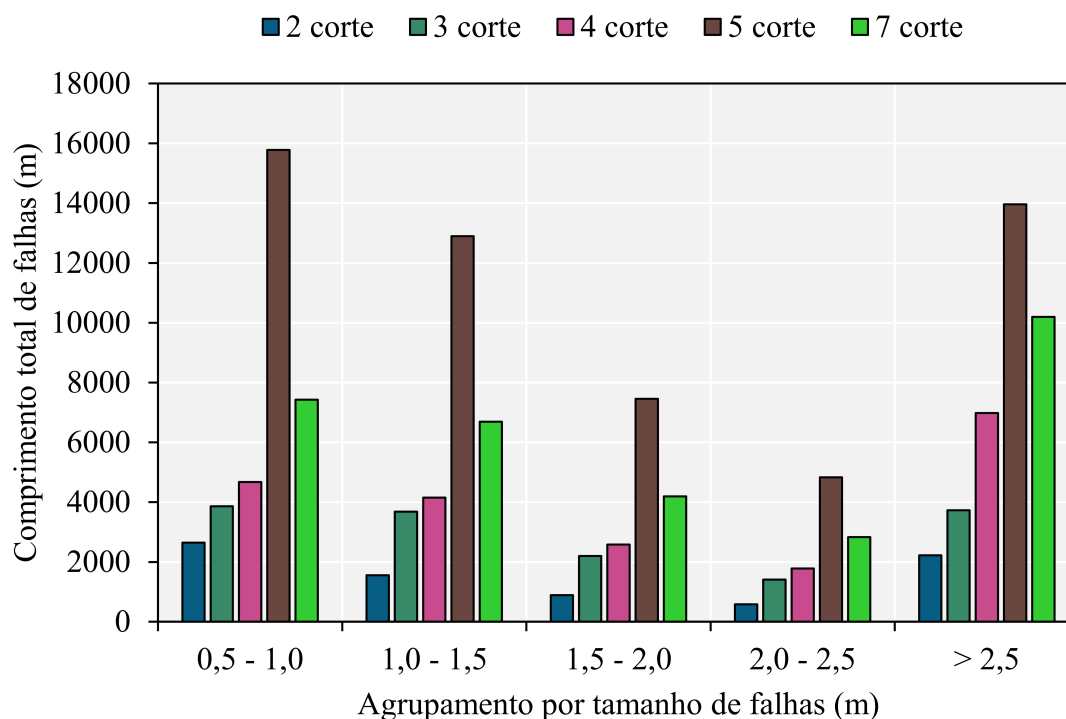


Figura 3.7: Frequência da ocorrência de falhas agrupadas por tamanho.

3.5.3 Custo dos fertilizantes aplicados sobre as falhas

O desperdício de fertilizantes aplicados sobre as falhas custa em média R\$ 215,00 ha⁻¹ por corte. Considerando um ciclo de 5 cortes, onde ocorrerão 4 adubações de cobertura, o valor chega a R\$ 860,00 ha⁻¹, equivalente a 9,5% do valor investido em tratamentos culturais ao longo do ciclo (SOCICANA, 2019). Se for considerada a média do quarto corte, onde o canavial apresentou índices mais elevados de falhas, o desperdício chega a R\$ 302,00 ha⁻¹ (Figura 3.8).

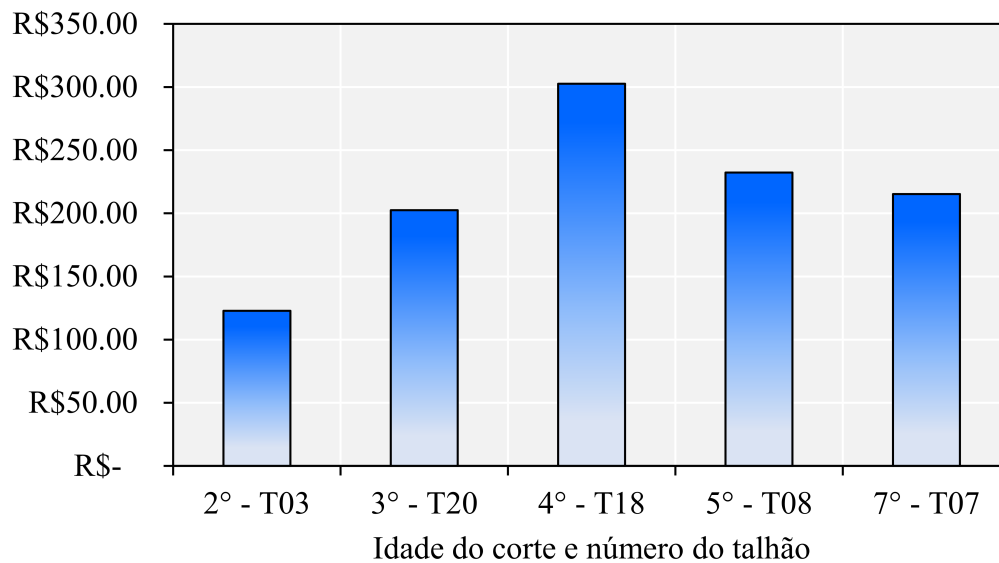


Figura 3.8: Custo com adubação de falhas no período do experimento em função da idade do canavial, segundo SOCICANA (2019), com dólar médio cotado em R\$ 4,08.

No mundo são cultivados 26 milhões de hectares de cana-de-açúcar (FAO, 2020). Considerando que 80% dos canaviais recebam adubação de cobertura e que os valores médios investidos em fertilizantes sejam equivalentes ao levantado, perdem-se aproximadamente R\$ 4,5 bilhões anualmente. No Brasil, responsável pelo cultivo de 8,442 milhões de hectares (CONAB, 2020), o desperdício alcança R\$ 1,45 bilhões ao ano.

Este desperdício representa custos diretos do Nitrogênio e do Potássio aplicado sobre as falhas. No entanto, outros gastos incidem sobre a aplicação, como despesas operacionais dos maquinários, que apresentam menor capacidade operacional por fazer paradas adicionais para reabastecimento de fertilizantes que foram aplicados sobre as falhas, por isso, estudos devem avaliar o rendimento das operações de distribuição de fertilizantes. Custos relacionados ao armazenamento e transporte dos insumos aplicados sobre as falhas incrementam o prejuízo trazido por sua aplicação, porém são difíceis de ser mensurados devido a distância das áreas de aplicação do almoxarifado, que podem variar.

Os dados levantados nesse trabalho apontam a importância de investir em tecnologias de corte automático de seções que fazem a detecção das falhas de rebrota na cana-de-açúcar em tempo real, comandando um atuador para efetuar a interrupção da aplicação. Sensores fotoelétricos para a detecção das falhas em tempo real são efetivos de acordo com (MOLIN; VEIGA, 2016), portanto, estes devem ser integrados a atuadores que poderão trazer economia de fertilizantes, aumento da rentabilidade das

lavouras de cana-de-açúcar, e redução dos impactos ambientais da atividade.

3.6 Conclusões

Adubar as falhas de cana-de-açúcar não é necessário, pois não influencia na produtividade das plantas presentes nas extremidades da falha.

Deixar de adubar as falhas reduz o custo da adubação de cobertura e os impactos ambientais causados pela aplicação desnecessária de fertilizantes minerais na lavoura.

Seria possível economizar em média R\$ 215,00 (US\$ 52,69) por hectare adotando a prática estudada neste trabalho.

3.7 Referências

BASSO, B.; CAMMARANO, D.; FIORENTINO, C.; RITCHIE, J. T. Wheat yield response to spatially variable nitrogen fertilizer in Mediterranean environment. **European journal of Agronomy**, Elsevier, v. 51, p. 65–70, 2013.

BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; SCALA, N. L. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agro-nomy for Sustainable Development**, Springer, v. 38, n. 2, p. 1–23, 2018.

CONAB. ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA V.6 - SAFRA 2019/20 - N.4 - Quarto levantamento | ABRIL 2020, **Conab - Safra Brasileira de Cana-de-açúcar**. 2020. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar/item/download/31590_6cfbbc41aa04783c69113c50fa499cba. Acesso em: 13 jul. 2021.

ERNANI, P.; SANGOI, L.; RAMPAZZO, C. Lixiviação e imobilização de nitrogênio num nitossolo como variáveis da forma de aplicação da uréia e da palha de aveia. **Revista brasileira de ciência do solo**, SciELO Brasil, v. 26, n. 4, p. 993–1000, 2002.

ESPIRONELO, A. Contribuição do Instituto Agronômico de Campinas (IAC) para a nutrição e adubação da cana-de-açúcar: II. Fósforo em cana-planta. **STAB, Piracicaba**, v. 8, n. 2, p. 14–21, 1989.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2020**. FAO, 2020. ISBN 978-92-5-133441-6. Disponível em: <http://www.fao.org/documents/card/en/c/cb1447en>. Acesso em: 18 ago. 2021.

FERNANDES, A. Cálculos na Agroindústria da cana de açúcar. Piracicaba. **STAB: Açúcar, Alcool e Subprodutos**, p. 193, 2000.

FILHO, J. O.; RODELLA, A.; BELTRAME, J.; LAVORENTI, N. Doses, fontes e formas de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar. **STAB**, v. 17, n. 4, p. 39–41, 1999.

GALLOWAY, J. N.; COWLING, E. B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, BioOne, v. 31, n. 2, p. 64–71, 2002.

GILIO, L.; MORAES, M. A. F. D. de. Sugarcane industry's socioeconomic impact in São Paulo, Brazil: A spatial dynamic panel approach. **Energy Economics**, Elsevier, v. 58, p. 27–37, 2016.

HOWARTH, R. Human acceleration of the nitrogen cycle: drivers, consequences, and steps toward solutions. **Water Science and Technology**, IWA Publishing, v. 49, n. 5-6, p. 7–13, 2004.

IEA. **Instituto de Economia Agrícola (IEA)**. 2021. Disponível em: <http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/TerTexto.php?codTexto=15931>. Acesso em: 13 jul. 2021.

JUNIOR, R. C. B.; LANDELL, M. A.; SILVA, D.; BIDÓIA, M. A. P.; SILVA, T.; JÚNIOR, J. T.; SILVA, V.; ANJOS, I. Censo varietal IAC de cana-de-açúcar no Brasil-safra 2017/18 e na região centro-sul-safra 2018/19. **Campinas: Instituto Agrônômico**, 2019.

MALAVOLTA, E. Fertilizing for high yield sugarcane. **Basel: IPI**, 1994.

MATSUOKA, S.; STOLF, R. **Sugarcane tillering and ratooning: Key factors for a profitable cropping, Chapter 5 in: Goncalves, JF & Correia, KD (eds.) Sugarcane: Production, cultivation, and uses.** [S.l.]: Nova Science Publishers, Inc. New York, 2012.

MOLIN, J. P.; VEIGA, J. P. S. Spatial variability of sugarcane row gaps: measurement and mapping. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, p. 347–355, jun. 2016, publisher: Editora da Universidade Federal de Lavras. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/cagro/a/gcDL8xsB4ZwLcTLDkRb6L7q/?lang=en>. Acesso em: 12 jul. 2021.

NETO, J. D.; FIGUEREDO, J. L. C.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO HAMILTON M. ND AZEVEDO, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 283–288, jun. 2006, publisher: Departamento de Engenharia Agrícola - UFCG. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/rbeaa/a/Mdbny4VBnjZKFvsqXjD5bzb/?lang=pt>. Acesso em: 14 jul. 2021.

NEVES, L. S.; ERNANI, P. R.; SIMONETE, M. A. Mobilidade de potássio em solos decorrente da adição de doses de cloreto de potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 25–32, fev. 2009, publisher: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/rbcs/a/HYQwxBKxfKYY8tCqJYMZkWD/?lang=pt>. Acesso em: 14 jul. 2021.

NOVOPLANSKY, A. Picking battles wisely: plant behaviour under competition. **Plant, cell & environment**, Wiley Online Library, v. 32, n. 6, p. 726–741, 2009.

OLIVEIRA, I. A.; SÁ, A. M. L.; GONÇALVES, M. C.; PEREIRA, H. J.; NETO, F. A.; MATOS, K. S.; JR, J. E. A. B. A survey of causal agents associated with sugarcane yellowing in Northeast Brazil. **Crop Protection**, Elsevier, v. 138, p. 105326, 2020.

OTTO, R.; SILVA, A.; FRANCO, H.; OLIVEIRA, E.; TRIVELIN, P. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and tillage research**, Elsevier, v. 117, p. 201–210, 2011.

OTTO, R.; VITTI, G. C.; LUZ, P. H. C. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, SciELO Brasil, v. 34, p. 1137–1145, 2010.

PAULA, V. R.; MOLIN, J. P. Assessing damage caused by accidental vehicle traffic on sugarcane ratoon. **Applied Engineering in Agriculture**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 29, n. 2, p. 161–169, 2013.

SANTOS, M. A. L.; SILVA, S.; ZOCOLER, J. L.; TEODORO, I.; NETO, J. D.; SOUSA, J. S. Avaliação de falhas na brotação da cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica. **Agropecuária Científica no Semi-Árido**, p. 30–37, 2013.

SILVA, G. J. da; BERG, E. C.; CALIJURI, M. L.; SANTOS, V. J. dos; LORENTZ, J. F.; ALVES, S. do C. Aptitude of areas planned for sugarcane cultivation expansion in the state of São Paulo, Brazil: a study based on climate change effects. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Elsevier, v. 305, p. 107164, 2021.

SOCICANA. **Custo médio operacional região de Guariba/SP. Propriedade de pequena escala - até 50 hectares**. 2019. Disponível em: <http://socicana.com.br/custos-de-producao/>. Acesso em: 07 jan. 2021.

SOUZA, G. S.; SOUZA, Z. M.; SILVA, R. B.; ARAÚJO, F. S.; BARBOSA, R. S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. **Pesquisa agropecuária brasileira**, SciELO Brasil, v. 47, p. 603–612, 2012.

STOLF, R. Methodology for gap evaluation on sugarcane lines. **Methodology for gap evaluation on sugarcane lines**, v. 4, p. 12–20, 1986.

TAYT'SOHN, F. C. O.; NUNES, A. M.; JUNIOR, A. O. P. Assessing sugarcane expansion to ethanol production under climate change scenarios in Paranaíba river basin–Brazil. **Biomass and Bioenergy**, Elsevier, v. 119, p. 436–445, 2018.

TOPPA, E. V. B.; JADOSKI, C. J.; JULIANETTI, A.; HULSHOF, T.; ONO, E. O. Physiology development in the vegetative stage of sugarcane. **Applied Research & Agrotechnology**, v. 3, n. 2, p. 169–186, 2010, number: 2. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/repaa/article/view/1064>. Acesso em: 14 jul. 2021.

VASANTHA, S.; SHEKINAH, D. E.; GUPTA, C.; RAKKIYAPPAN, P. Tiller production, regulation and senescence in sugarcane (*Saccharum species hybrid*) genotypes. **Sugar Tech**, Springer, v. 14, n. 2, p. 156–160, 2012.

VITTI, A.; TRIVELIN, P.; GAVA, G.; OLIVEIRA, M.; PENATTI, C. Efeito residual da adubação nitrogenada (15 N) no ciclo subsequente da cultura de cana-de-açúcar (Compact disc). IN: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 25., 2002, Rio de Janeiro. **Anais:.... Rio de Janeiro: SBCS**, 2002.

ZAHOOR; AHMAD, W.; HIRA, K.; ULLAH, B.; KHAN, A.; SHAH, Z.; KHAN, F. A.; NAZ, R. M. M. Role of nitrogen fertilizer in crop productivity and environmental pollution. **International Journal of Agriculture and Forestry**, v. 4, n. 3, p. 201–206, 2014, publisher: Scientific and Academic Publishing. Disponível em: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20143234539>. Acesso em: 14 jul. 2021.

CAPÍTULO 4 – Considerações finais

Com base nos resultados obtidos, pode-se considerar que:

As falhas existentes nas linhas da cultura da cana-de-açúcar são espaços vazios que possibilitam o gerenciamento estratégico de insumos sobre o local. O gerenciamento estratégico de insumos sobre o local, por meio do corte automático da seção, é uma técnica promissora que pode trazer em média R215,00(US52,69) por hectare de economia para o setor canavieiro.

Por um lado, a interrupção do uso de fertilizantes sobre o local com falha, pode trazer economia de insumos, bem como a redução dos impactos ambientais da aplicação dos fertilizantes sobre a lavoura. Por outro lado, o uso de imagens de drone para levantar o mapeamento das falhas, também é útil para definir estratégias para replantio de áreas e renovação de canaviais, tendo em vista que a redução na produção da cana-de-açúcar pode ser menor reduzindo o tamanho médio das falhas com o replantio localizado de mudas.

Uma das preocupações do setor era até qual comprimento de falhas as plantas presentes na extremidade da falha podiam compensar a produção das plantas faltantes. Na presente, tese verificou-se que o comprimento de até 0.50 m se mantém. Ou seja, falhas com até essa distância não afetam a produtividade do canavial. Sabe-se agora que a cada 1% de falha tem-se redução de 0,62% na produtividade. Além disso, essa redução pode ser menor utilizando estratégias de cultivo que reduzam o atropelamento das soqueiras e consequentemente o tamanho médio das falhas.