



ALEXSANDRO CARVALHO SANTIAGO

**ANÁLISE DE TRILHA E ESPECTROSCOPIA NO
INFRAVERMELHO PRÓXIMO NA CULTURA DA CANOLA**

**LAVRAS - MG
2021**

ALEXSANDRO CARVALHO SANTIAGO

**ANÁLISE DE TRILHA E ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO
NA CULTURA DA CANOLA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Guilherme Vieira Pimentel
Orientador

Prof. Dr. Adriano Teodoro Bruzi
Coorientador

**LAVRAS - MG
2021**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Santiago, Alexsandro Carvalho.

Análise de trilha e espectroscopia no infravermelho próximo na
cultura da canola / Alexsandro Carvalho Santiago. - 2021.

77 p. : il.

Orientador(a): Guilherme Vieira Pimentel.

Coorientador(a): Adriano Teodoro Bruzzi.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. *Brassica napus* L var. *oleífera*. 2. Associação entre
caracteres. 3. NIR. I. Pimentel, Guilherme Vieira. II. Bruzi, Adriano
Teodoro. III. Título.

ALEXSANDRO CARVALHO SANTIAGO

**ANÁLISE DE TRILHA E ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO
NA CULTURA DA CANOLA**

**TRAIL ANALYSIS AND NEAR INFRARED SPECTROSCOPY IN CANOLA
CULTURE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 30 de julho de 2021.

Dra. Flavia Andrea Neri Silva UFU

Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein UFLA

Dr. Adriano Teodoro Bruzi UFLA

Prof. Dr. Guilherme Vieira Pimentel
Orientador

Prof. Dr. Adriano Teodoro Bruzi
Coorientador

**LAVRAS - MG
2021**

A Deus.

Aos meus pais, Dorotea e Vicente.

*A toda a minha família e amigos que me encorajaram,
me incentivaram e me apoiaram nessa caminhada.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por toda a força e determinação proporcionadas a mim, por ter guiado meus passos e permitido que eu chegasse até aqui.

Aos meus pais, Dorotea e Vicente, guerreiros que me deram força, me apoiaram e me ensinaram grandes valores na vida, essa vitória também é de vocês.

Aos meus irmãos, Ailton e Fabiana, ao meu sobrinho Paulo Henrique, e a toda a minha família, que se fizeram presentes me ajudando nessa jornada.

Ao Professor Guilherme Vieira Pimentel, pelo exemplo profissional e orientação, por todos os ensinamentos, colaborando para meu crescimento pessoal e profissional, pela amizade, pela paciência e confiança, e por toda a ajuda, sem a qual não seria possível terminar este trabalho.

Ao Professor Adriano Teodoro Bruzi, pela amizade, pelos ensinamentos, paciência, confiança, orientação, incentivo e toda a ajuda, sem a qual não seria possível terminar este trabalho.

Ao Professor Paulo Ricardo Gherardi Hein e orientados, por todo auxílio e paciência, tornando possível o ajuste do modelo multivariado Nir.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação pessoal e profissional.

À Doutora Dyanna Rangel Pereira, por todo o auxílio e paciência, tornando possível a realização da análise de trilha.

Aos amigos da universidade, que levarei para a vida, em especial à Ludmila, Joyce e Aline, por o todo apoio e incentivo, vocês tornaram a caminhada mais leve.

A todos os amigos, em especial ao Neto, Gabriel, Phelipe e Guilherme, que se tornaram irmãos, obrigado pela amizade, apoio, incentivo, e por todas as risadas, vocês foram essenciais nessa trajetória.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, pela oportunidade e estruturas concedidas.

Aos funcionários do setor de Grandes Culturas, pela disponibilidade e receptividade.

A todos os membros do Grupo Agroenergia e do Núcleo de Núcleo de Estudos em Cana-de-Açúcar, pelos conhecimentos adquiridos e por toda a ajuda e boa vontade demonstrada durante todo o tempo de convívio.

À Embrapa Agroenergia, pelo fornecimento dos grãos de canola, possibilitando tal estudo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão da bolsa de estudos e pelo suporte financeiro para a realização dos experimentos.

A todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a concretização de mais essa conquista.

Muito obrigado!

RESUMO

A cultura da canola vem se destacando entres as principais culturas energéticas no cenário mundial, e no Brasil, seu cultivo ocorre predominantemente em regiões de altas latitudes com clima subtropical no sul do país, mas graças ao seu elevado potencial produtivo, existe grande interesse na expansão do seu cultivo para a região sudeste. Nesse contexto, estudos com a cultura se tornam cruciais para expandir seu cultivo. Com isso, visando conceder embasamento a futuros programas de melhoramento genético da cultura, na busca de genótipos mais produtivos nas condições de cerrado, objetivou-se mensurar o efeito da associação entre caracteres agronômicos relacionados à produtividade de grãos de canola, cultivada em diferentes épocas de semeadura, no que concerne aos efeitos diretos e indiretos obtidos na análise de trilha. E ainda visando acelerar as avaliações nos programas de melhoramento, objetivou-se obter um método alternativo ao químico tradicional, para quantificar o teor de óleo nos grãos, ajustando um modelo multivariado que seja capaz de prever o teor de óleo nos grãos, através da análise por espectroscopia na região do infravermelho próximo. O experimento foi conduzido em campo, no ano de 2019, utilizando-se o delineamento de blocos ao acaso, em parcelas subdivididas no tempo, sendo quatro parcelas (épocas de semeadura) e seis subparcelas (híbridos de canola), com quatro repetições. Em cada híbrido foram realizadas observações fenológicas determinando-se a produtividade de grãos. Os dados foram submetidos à análise de variância em ambiente R pelo teste F, a 5 e 1% de probabilidade. O teor de óleo nos grãos foi determinado pelo método químico tradicional, e com base na assinatura espectral no infravermelho próximo de amostras dos grãos foi estabelecida regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R) para estimar o teor de óleo nos grãos de canola. As épocas de semeadura influenciaram os componentes de produção e o teor de óleo dos grãos de todos híbridos. Os caracteres número de grãos em cinco plantas (0,6857) e altura (0,4943) apresentaram maiores estimativas de correlação positiva com a produtividade de grãos, assim como os maiores valores de efeito direto positivo sobre a produtividade, 0,2494 e 0,1595 respectivamente. Por sua vez, o ciclo total (-0,7848), juntamente com dias em florescimento (-0,4520), apresentaram correlação significativa negativa com a produtividade. Assim, tais caracteres na cultura da canola merecem maior atenção ao praticar seleção em programas de melhoramento no intuito de aumentar a produtividade de grãos, especialmente o ciclo da cultura que se figura com um alto efeito direto negativo sobre a produtividade (-0,6157). A técnica NIR associada à PLS-R foi capaz de prever o teor de óleo nos grãos, resultando em bons modelos preditivos que podem ser usados com sucesso na análise da qualidade das amostras após colheita e, assim, realizar seleção de genótipos de forma mais rápida. O melhor modelo apresentou um R^2 de 0,86 e RMSE de 1,56 na validação externa, porém, é preciso desenvolver modelos com maior variação no teor de óleo nos grãos, ampliando o número de amostras para englobar toda possível variação existente nos genótipos de canola.

Palavras-chave: *Brassica napus* L. var. *oleífera*. Oleaginosa. Associação entre caracteres. Melhoramento genético. NIR.

ABSTRACT

The canola crop has been standing out among the main energy crops on the world stage and in Brazil its growth occurs especially in regions of high latitudes with a subtropical climate in the south of the country, but due to its high yield potential, there is a great interest on expanding its cultivation to the southeast region. In this sense, canola studies become crucial to expand its cultivation. Therefore, aiming to provide basis to future plant breeding programs as looking for more productives genotypes, the aim was to measure the effect of the association between related agronomic traits related to the yield of canola grains, grown at different sowing times regarding to the direct and indirect effects obtained from the path analysis. And also aiming speed evaluations up in plant breeding, the aim was to obtain an alternative method to the traditional chemistry, to quantify the oil content in grains, and setting a multivariate model which is able to predict the oil content in the grains through the analysis by spectroscopy in the near infrared region. The experiment was conducted in the field, in 2019 and a randomized-complete blocks design was used in split-plot system about the time, it was four spots (sowing season) and six subspots (canola hybrids) with four replicates. In each hybrid phenological observations were carried out to define the grain yield. Data were subjected to analysis of variance in the R program by the F test by 5 and 1% of probability. The oil content in the grains was determined by the traditional chemical method, and based on the near infrared spectral signature of grain samples, partial least squares regression (PLS-R) was established to estimate the oil content in canola grains. The sowing dates have influenced the yield components and also the oil content of the grains of all hybrids. The characters number of grains in five plants (0.6857) and height (0.4943) showed the highest estimates of positive correlation with grain yield, as well as the highest values of positive direct effect on yield, 0.2494 and 0.1595 respectively. In turn, the complete cycle (-0.7848), together with days in flowering (-0.4520), showed a significant negative correlation with yield. Thus, such characters in the canola crop deserve better attention when practicing selection in breeding programs in order to increase grain yield, especially the crop cycle that has a high direct negative effect on yield (-0.6157). The NIR technique associated with PLS-R was able to predict the oil content in the grains, resulting in good predictive models that can be used successfully in the analysis of the quality of samples after harvest and, thus, perform genotype selection faster. The best model presented an R^2 of 0.86 and RMSE of 1.56 in the external validation, however, it is necessary to develop models with better variation in the oil content in the grains, expanding the number of samples to encompass all possible variations in the canola genotypes.

Keywords: *Brassica napus* L. var. *oleifera*. Oilseed. Association between characters. Genetical enhancement. NIR.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Cultura da canola	12
2.1.1	Origem e taxonomia da canola.....	13
2.1.2	Aspectos econômicos da cultura da canola	15
2.1.3	Importância do óleo de canola na produção de biodiesel	17
2.1.4	Segmentação dos sistemas produtivos de canola no Brasil.....	19
2.2	Tropicalização da cultura da canola.....	21
2.2.1	Épocas de semeadura	22
2.3	Melhoramento genético da canola	24
2.4	Interação genótipos x ambientes	28
2.5	Análise de trilha.....	29
2.6	Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)	31
3	MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1	Local de experimentação e cultivares	34
3.2	Condução do experimento e delineamento experimental	36
3.3	Características avaliadas	36
3.3.1	Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR)	37
3.3.2	Análise estatística	38
3.3.2.1	Estatística multivariada para dados espectrais	38
3.3.2.2	Análise de trilha.....	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	Análise de variância	42
4.2	Análise de trilha.....	44
4.3	Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR)	50
5	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

A canola é considerada a terceira oleaginosa de maior importância no mundo, respondendo por cerca de 14% da produção mundial de óleos comestíveis, ficando atrás apenas da palma de óleo (dendê) com 36% e da soja com 28% (USDA, 2021b). Mundialmente, a produção de canola em 2019/20 atingiu o marco de 69,22 milhões de toneladas, com ganhos de produção na Austrália, Rússia, Paraguai e Estados Unidos; e declínios na China, Ucrânia, Índia, União Europeia e no Canadá (USDA, 2021a). No Brasil, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2021) a cultura da canola, apresentou uma produção de 32,2 mil toneladas em 2020, sendo o Rio Grande do Sul e Paraná os principais estados produtores.

Seu óleo recebe destaque no mercado alimentício (FRIEDT *et al.*, 2018), e a canola é ainda, uma cultura energética, com crescente potencial de produção de biodiesel (MICUANSKI *et al.*, 2014). Considerando que a demanda por biodiesel vem crescendo, torna-se necessário o incentivo e a busca por culturas alternativas à soja, principal matéria-prima usada para a produção de biodiesel no Brasil (BERGMANN *et al.*, 2013). Além disso, a partir da extração do seu óleo, obtém-se o farelo de canola (VALE *et al.*, 2012), caracterizado por ser um ótimo suplemento proteico na formulação de rações para aves, ovinos, suínos e bovinos (SEABRA JR. *et al.*, 2017). Deste modo, o desenvolvimento de pesquisas voltadas a esta cultura fortalece o mercado alimentício e de produção de farelo e rações (MICUANSKI *et al.*, 2014).

Em relação ao cultivo, a canola é semeada nas estações mais frias do ano, constituindo uma alternativa para diversificação de culturas de inverno e uma boa opção para a rotação na cadeia produtiva de grãos, em sucessão com as culturas da soja e milho, e rotação com culturas de inverno, como o trigo. Por ser uma brassica, seu cultivo ainda diminui a incidência de problemas fitossanitários nas leguminosas e gramíneas cultivadas no sistema de produção, contribuindo na estabilidade e na qualidade da produção de grãos. Com isso, graças às características presentes na planta, como tolerância à seca observada durante o ciclo vegetativo de plantas cultivadas no sul do país, associado ao seu elevado potencial produtivo, é de grande interesse a expansão do cultivo da canola para a região sudeste do Brasil (TOMM, 2007).

Contudo, nos países da América do Sul os investimentos em pesquisas para o desenvolvimento de tecnologias de manejo no cultivo da canola têm sido escassos (SEABRA JR. *et al.*, 2017), dificultando a utilização da cultura no Brasil. Tendo em vista o desafio em garantir o abastecimento de óleo para o consumo humano, e para o biodiesel no mercado interno e externo, numa eventual quebra de safra de soja que atende tal mercado, são necessários estudos que busquem a introdução e adaptação de novas oleaginosas, como a canola e o

girassol, opções de segunda safra (OSAKI; BATALHA, 2011). Assim, é necessário melhorar as recomendações técnicas acerca do manejo da canola, proporcionando ganhos significativos na rentabilidade e na segurança do seu cultivo, resultando na expansão da cultura (SEABRA JR. *et al.*, 2017).

Para tornar possível a expansão da área cultivada, é necessário buscar cultivares mais produtivas (KIIHL; TOMM, 2017), através de investimentos em programas de melhoramento genético (SILVA *et al.*, 2017). Porém, em programas de melhoramento, busca-se melhorar um caráter principal e ao mesmo tempo manter ou melhorar a expressão de outros caracteres. Assim, é importante o conhecimento da relação existente entre caracteres (LOPES *et al.*, 2002), estudando tais correlações de forma conjunta com a análise de trilha (WRIGHT, 1921), propiciando identificar quais caracteres podem ser usados como critérios de seleção indireta para produtividade (CARVALHO *et al.*, 2002), um caráter complexo de baixa herdabilidade.

Tratando-se das avaliações após a colheita nesses programas melhoramento de plantas, é preciso buscar métodos alternativos ao processo convencional usado para quantificar o teor de óleo, por se tratar de um método demorado, que utiliza grandes quantidades de produtos químicos (CHENG *et al.*, 2017). A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) surge como uma ferramenta ideal para rastrear características (FONT; DEL RÍO-CELESTINO; DE HARO-BAILÓN; 2006), dado que um espectro NIR fornece informações da composição química das amostras, como teor de óleo (PASQUINI, 2003). Tudo isso, num curto período de tempo, propiciando processar de forma imediata as amostras de grãos após colheita, e assim realizar seleção de materiais de qualidade (PETISCO *et al.*, 2010), tornando a ferramenta muito vantajosa ao acelerar avaliações. Porém, para quantificar tais propriedades através do NIR é necessário desenvolver modelos multivariados (PASQUINI, 2003).

Nesse contexto, estudos com a cultura da canola se tornam cruciais para expandir seu cultivo. Diante do que foi abordado, busca-se por meio deste trabalho conceder embasamento a futuros programas de melhoramento genético da cultura, na busca de genótipos mais produtivos nas condições de cerrado, propiciando a expansão do cultivo de canola no país. E ainda, visando acelerar as avaliações do teor de óleo dos genótipos nos programas de melhoramento, obter uma ferramenta alternativa ao processo químico convencional, para quantificar o teor de óleo nos grãos de forma rápida e não destrutiva.

Assim, objetivou-se mensurar o efeito da associação entre caracteres agronômicos relacionados à produtividade de grãos de canola cultivada em diferentes épocas de semeadura, no que concerne aos efeitos diretos e indiretos obtidos na análise de trilha. Bem como ajustar

um modelo multivariado que seja capaz de prever o teor de óleo em seus grãos, através da análise por espectroscopia na região do infravermelho próximo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cultura da canola

A canola é uma cultura oleaginosa que apresenta elevados teores de óleo em seus grãos, de 36% a 42%, e contém altos teores de proteína em seu farelo, de 36% a 38%, usado na produção de ração animal (VALE *et al.*, 2012). Essa oleaginosa de inverno foi desenvolvida a partir do melhoramento genético da colza (KAEFER *et al.*, 2014). Uma vez que colza é o nome tradicional para as culturas oleaginosas da família das crucíferas, e pode ser dividida em dois tipos: colza industrial e canola. A diferença entre elas está em seu perfil químico de ácidos graxos e glucosinolatos. Geralmente, colza industrial refere-se a qualquer tipo de colza com alto conteúdo de ácido erúico no óleo (45% ou mais), enquanto que a canola é caracterizada por baixo nível de ácido erúico (menos de 2%) e baixos níveis de glucosinolatos (menos de 30 micromoles) (FRIEDT *et al.*, 2018).

É uma cultura caracterizada como anual, com ciclo variando de 107 a 166 dias (ESTEVEZ *et al.*, 2014), no entanto, alguns híbridos comerciais na região do cerrado podem encurtar seu ciclo, variando em torno de 114 a 117 dias (LAVIOLA *et al.*, 2019), sendo que a duração de cada fase é influenciada pela variedade cultivada, umidade, temperatura e fotoperíodo (CANOLA COUNCIL OF CANADA, 2020). As plantas podem atingir alturas acima de 1,0 m de comprimento, com raízes que medem até 1,2 m de profundidade, apresentando folhas do tipo lobuladas e dentadas, e pequenas vagens (sílquas) com pequenas sementes brancas, amarelas ou escuras (KRISHNA, 2013). É uma planta pertencente à família Brassicaceae, que inclui muitas culturas e plantas daninhas, e representa uma das poucas dicotiledôneas de grande importância nos sistemas de produção, que são frequentemente dominados por cereais e milho, tornando-se uma opção na rotação de culturas (FRIEDT *et al.*, 2018).

A canola cultivada na Ásia e Europa é conhecida como canola de inverno, já no norte da Europa, Austrália e no Canadá, se tem a canola de primavera; elas se diferenciam por um mecanismo genético que controla o requisito de vernalização para promover o início da floração (SNOWDON; LÜHS; FRIEDT, 2007). Assim, no Brasil, devido as condições climáticas, se tem cultivado a canola de primavera que é da espécie *Brassica napus* L. var. *oleífera* (TOMM *et al.*, 2010). E ainda, segundo Tomm (2006), a semeadura de canola em regiões tropicais deve ser feita em altitudes superiores a 600 metros, para que as temperaturas sejam mais amenas, principalmente no período noturno, durante o período reprodutivo, evitando perdas por

abortamento de flores e siliquis com temperaturas acima de 27 °C; tornando a cultura uma opção de produção de grãos oleaginosos no inverno.

As propriedades agronômicas das primeiras cultivares de canola mostraram-se menos produtivas que as do tipo tradicional. Mas, nas últimas décadas com esforços intensivos em melhoramento, se teve uma melhoria em suas características agronômicas, como por exemplo, o aumento no rendimento de sementes (RAHMAN, 2013), sendo que atualmente no mundo todo, os híbridos são predominantemente mais usados como variedades comerciais de colza (FRIEDT *et al.*, 2018). E hoje no Brasil, existem alguns genótipos de canola disponíveis no mercado, assim, a cultura, se bem manejada, se adapta as diversas condições de cultivo, mostrando-se uma alternativa de renda ao produtor, e graças à qualidade do seu óleo a mesma se encontra em expansão (ESTEVEZ *et al.*, 2014).

A cultura não compete por área com a soja, uma das principais culturas anuais no país, por se tratar de uma espécie de inverno (DURIGON *et al.*, 2016). Portanto, ela vem se tornando, na região sul do Brasil, juntamente com o milho safrinha e o trigo, uma excelente opção de cultivo de inverno, além de constituir uma sucessão adequada ao cultivo de soja, graças a sua adaptabilidade às condições edafoclimáticas, preços vantajosos (KAEFER *et al.*, 2014), e por reduzir problemas relacionados a incidência de doenças em leguminosas (como a soja e o feijão) e em gramíneas (como o milho, trigo e outros cereais), podendo contribuir com a estabilidade e a qualidade da produção de grãos (TOMM, 2007), proporcionando aumento no rendimento de culturas utilizadas posteriormente ao seu cultivo (DURIGON *et al.*, 2016). E ainda, por evitar o pousio, pode contribuir na redução da degradação do solo (VALE *et al.*, 2012).

2.1.1 Origem e taxonomia da canola

Segundo registros arqueológicos, plantas de colza foram cultivadas à 2000 a.C. Seu centro de origem primário e região de maior diversidade genética se encontra na região euro-siberiana. Sua introdução na América do Norte ocorreu através da migração humana, sendo que a colza foi cultivada pela primeira vez comercialmente, no Canadá, em 1942, visando a produção de lubrificantes para navios de guerra e para seu uso como óleo para lâmpadas, por produzir uma fumaça branca durante a queima (KRISHNA, 2013). Com o surto da Segunda Guerra Mundial e o bloqueio de fontes europeias, o governo canadense priorizou a produção de colza, pois seu óleo era um excelente lubrificante para motores marítimos (THIYAM-HOLLÄNDER *et al.*, 2012). Já na Austrália, foi cultivada comercialmente em 1969 (KRISHNA, 2013).

Após a Segunda Guerra Mundial, com a redução da demanda, devido a mudança para motores a diesel, houve uma queda na produção de colza canadense, e assim, iniciou-se a procura por mercados alternativos para a colza, como a alimentação. No entanto, devido sua cor verde, sabor acentuado e altos teores de ácido erúico e glucosinolatos, seu uso na alimentação era limitado. Só no final da década de 50, surgiram pesquisas inovadoras sobre criação da canola (THIYAM-HOLLÄNDER *et al.*, 2012). A partir disso, a evolução da colza passou por mudanças morfofisiológicas até se tornar a canola de hoje, adequada para consumo humano e animal (GUPTA, 2007). A mudança para a canola refletiu principalmente na composição do óleo, com a redução do teor de ácido erúico para menos que 2% e menos de 30 micromoles de glucosinolatos por grama de matéria seca da semente (FRIEDT *et al.*, 2018); e ainda, houve aumento nos teores de ácido oleico para aproximadamente 60%, de ácido linoleico (cerca de 20%) e ácido linolênico (cerca de 10%) (THIYAM-HOLLÄNDER *et al.*, 2012).

Diante disso, se tem a origem do nome canola, que vem da sigla em inglês *CAN*adian *Oil*, *Low Acid* que significa ‘óleo canadense com baixo teor de ácido’ (VALE *et al.*, 2012), e tal nome foi registrado no Canadá, indicando cultivares em que o óleo processado contém taxa adequada de ácido erúico para alimentação (SÜZER, 2015), menos que 2% (FRIEDT *et al.*, 2018). A cultura é importante na Europa desde o século XIII, a qual o óleo vegetal apresenta equilibrada quantidade de ácidos graxos essenciais, ômega 3-6-9, tornando-o saudável, de uso na cozinha e para o uso na indústria de alimentos processados no mundo (SÜZER, 2015). Seu óleo comparado com as demais oleaginosas é de qualidade superior na alimentação humana, contendo 6% de gordura saturada, e ainda 58% de gorduras monoinsaturadas conferindo propriedade de redução de partículas de LDL1, e 10% de Ômega 3 (VALE *et al.*, 2012).

A canola engloba três espécies: *Brassica napus* L., *Brassica rapa (campestris)* L. (três subespécies: *oleífera*, *trilocularis* e *dichotoma*), e *Brassica juncea* L. Czern (BARTHET *et al.*, 2016; BARTHET; DAUN, 2011). A cultura pertence à família *Brassicaceae* ou *Cruciferae*, que compreende cerca de 300 gêneros, com cerca de 4000 espécies. Incluindo uma série de plantas importantes, como repolho, couve Bruxelas, brócolis, plantas oleaginosas (colza, mostarda, crambe etc.), plantas daninhas (por exemplo a nabiça), e ainda, um membro muito importante da família, é a planta modelo *Arabidopsis thaliana* (agrião comum), que tem sido muito útil para pesquisa científica básica na família (FRIEDT *et al.*, 2018).

Pode-se destacar várias espécies dessa família que se tornaram importantes culturas agrícolas em todo o mundo. Dentre elas, oleaginosas como a canola ou colza, mostarda oriental e marrom (*Brassica juncea*), e mostarda preta (*Brassica nigra*), são destaques na economia

mundial. Enquanto que a mostarda etíope (*Brassica carinata*), camelina (*Camelina sativa*) e mostarda abissiniana (*Crambe abyssinica*) são considerados espécies que poderiam ser desenvolvidas para produção comercial, principalmente para óleo direcionado ao biocombustível e outros usos industriais na Europa e América do Norte. Além disso, as sementes de crucíferas ricas em óleo, ainda apresentam 20 a 35% de proteína em seu peso seco das sementes (WANASUNDARA, 2011).

2.1.2 Aspectos econômicos da cultura da canola

A canola é classificada entre as três principais oleaginosas do mundo (THIYAM-HOLLÄNDER *et al.*, 2012) ocupando o terceiro lugar, depois do óleo de palma e soja (USDA, 2021b). Seu óleo recebe destaque no mercado alimentício (FRIEDT *et al.*, 2018), no qual pode ser considerado um importante alimento funcional, graças ao seu papel na prevenção e tratamento de muitos distúrbios (LOGANES *et al.*, 2016). Caracterizado por ser rico em ácidos graxos ômega-6 e ômega-3, na proporção de 2:1, e seu consumo reduz o acúmulo de colesterol no sangue (KRISHNA, 2013). Destacando ainda em seu conteúdo, a presença de vitamina E, que pode contribuir com efeitos nutricionais (AUKEMA; CAMPBELL, 2011).

A área total mundial de canola compreende cerca de 34,88 milhões de hectares, sendo o Canadá com 8,46 milhões de hectares, a Índia com 7,4 milhões de hectares, a China com 6,58 milhões de hectares, Austrália com 1,8 milhões de hectares e Europa com 5,55 milhões de hectares (USDA, 2021b). Assim, Comunidade Europeia, Canadá, Índia, China e Austrália se enquadram como os maiores produtores de óleo de canola e de grãos no mundo. Mas por outro lado, enquanto o Canadá é o maior exportador mundial, tanto de grãos, como de óleo, os países da Comunidade Europeia e a China são grandes consumidores do grão e óleo bruto de canola, tornando-se grandes importadores destas matérias-primas (USDA, 2021a).

Dada a importância da cultura no mundo todo, sua produção de sementes por unidade de área aumentou sistematicamente nos últimos 40 anos (ZAJAC *et al.*, 2016). Saltando mundialmente de produtividades de 896 kg ha⁻¹ em 1979, para 2.072 kg ha⁻¹ em 2019; destacando-se produtividades de 2.242 kg ha⁻¹ no Canadá; 2.053 kg ha⁻¹ na China; 1.511 kg ha⁻¹ na Índia e 1.116 kg ha⁻¹ na Austrália, e uma produção mundial de 70 milhões de toneladas (FAO, 2021). Esse aumento da produção global de canola ao longo dos anos foi estimulado principalmente pela diversificação de usos de produtos advindos de *Brassicaceae*, e pela crescente pressão populacional; sendo o aumento da demanda atendido por abordagens convencionais e modernas de melhoramento de plantas, incluindo aquelas associadas a sementes, melhoria da

qualidade e modificação dos perfis de ácidos graxos de acordo com uso doméstico e industrial (GUPTA, 2007).

Mundialmente, o consumo de óleos vegetais continua a crescer, especialmente na China, com a maior população do mundo. Em 2001/02 o consumo doméstico de óleo vegetal era de 14,54 milhões de toneladas, saltando para 28 milhões de toneladas em 2011/12. Enquanto a produção é de apenas 11 milhões de toneladas, apresentando uma taxa de autossuficiência de 35,4%, tornando a China o maior importador de óleo e derivados de petróleo no mundo. Levando em conta o consumo, rendimento, qualidade e outros fatores relacionados ao suprimento de óleo comestível, óleo de colza desempenha um papel importante na China. Assim, é de grande importância o desenvolvimento da produção de canola, garantindo o suprimento de óleo comestível e atendendo as necessidades dos consumidores (FRIEDT *et al.*, 2018).

Enquanto que no Brasil, na safra 2020, foram produzidas 32,2 mil toneladas de grãos em uma área de 35,3 mil hectares, uma produção 33,7% menor que no ano de 2019, com produtividade média de 912 kg ha⁻¹, sendo que a maior produção de grãos desta oleaginosa está concentrada na região sul do país, nos estados do Rio Grande do Sul (31,4 mil toneladas) e o Paraná (0,8 mil toneladas) (CONAB, 2021). Destacando que há potencial para aumento dessas produtividades (VALE *et al.*, 2012), especialmente com a atual expansão do cultivo de canola da região sul do Brasil para o Sudoeste de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul (TOMM *et al.*, 2010; VALE *et al.*, 2012), por ser considerada uma ótima opção econômica para os produtores, e ainda pela enorme disputa pelo produto no mercado brasileiro e europeu (SEABRA JR. *et al.*, 2017).

Entretanto, no Brasil, mesmo com a garantia de compra de toda a canola produzida, a produção nacional de grãos de canola é insuficiente em relação a demanda, atendendo apenas 30% do consumo. No mercado de óleos vegetais nacional, a participação do óleo de canola representa menos que 1%, enquanto que em países como os EUA é superior a 20% (PERES *et al.*, 2005). E ainda vale destacar, que a cultura se caracteriza como uma excelente alternativa econômica, por não exigir ativos específicos, utilizando-se da mesma estrutura de equipamentos e máquinas disponíveis nas propriedades. Seu uso na rotação de culturas, especialmente com trigo, diminui problemas de doenças que afetam esse cereal e dá oportunidade de produção de óleos vegetais no inverno (SEABRA JR. *et al.*, 2017). Logo, diante da demanda do mercado e da indústria, é necessário desenvolver novas cultivares mais promissoras (GUPTA, 2007).

No entanto, a falta de investimentos em pesquisa no Brasil, dificulta a expansão do cultivo dessa oleaginosa no país, observando-se a necessidade de identificar épocas de

semeadura para regiões com maior altitude, ajuste de tecnologias de manejo, uso de fertilizantes, produção de tecnologia visando reduzir perdas na colheita, o que poderá contribuir decisivamente para o aumento da rentabilidade da cultura (TOMM, 2007). E ainda, para expandir o cultivo de canola, é necessário o desenvolvimento de novos híbridos adaptados a condições edafoclimáticas do Cerrado brasileiro.

2.1.3 Importância do óleo de canola na produção de biodiesel

O biodiesel é uma alternativa mais ecológica ao diesel, com redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), e efeitos, portanto, na saúde (POLLITT *et al.*, 2019), sendo considerado um combustível ambientalmente correto (GANDOLFI *et al.*, 2018). Estudos do *National Biodiesel Board* (NBB), mostraram que a queima de biodiesel pode emitir em média 67% menos hidrocarbonetos, 47% menos material particulado e 48% menos monóxido de carbono (GANDOLFI *et al.*, 2018). É produzido a partir de fontes biológicas, como óleos vegetais ou de gorduras animais, a partir da transesterificação, que é a reação pela qual óleos ou gorduras reagem com álcoois para formar ésteres de biodiesel e glicerol, empregando um catalisador ácido ou alcalino para aumentar a taxa de reação e produção (KARMAKAR *et al.*, 2010).

Atualmente, o Brasil, além de ser um grande produtor de soja também é um importante produtor e consumidor de biodiesel, visto que na matriz energética brasileira as fontes de energia renováveis são de grande importância (BERGMANN *et al.*, 2013). Com a criação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), em 2005, a produção desse biocombustível vem aumentando, e hoje o país ocupa o segundo lugar como maior produtor e consumidor de biodiesel no mundo, atrás dos Estados Unidos e à frente da Alemanha e da Argentina (BP ENERGY, 2020). Destacando que hoje, todo o diesel comercializado no Brasil apresenta 12% de biodiesel em sua composição, devendo chegar em 15% até 2023, de acordo com a Resolução Nº 16, de 29 de outubro de 2018 (CNPE, 2018) e o Despacho ANP Nº 621, de 06 de agosto de 2019, e perspectivas que essa porcentagem chegue a 20% até 2030 (ANP, 2020). Com isso, graças a essas políticas governamentais, a demanda por biodiesel vem crescendo, tornando-se necessário o incentivo e a busca por culturas alternativas à soja como fonte de biodiesel. Existem várias oleaginosas candidatas a serem matérias-primas para a produção de biodiesel no Brasil (BERGMANN *et al.*, 2013).

Devido à variedade de sementes encontradas nas diversas regiões do país é possível a utilização de diferentes oleaginosas para a produção de biodiesel (TAPANES *et al.*, 2013).

Dentre elas, estão a soja, canola, palma, mamona, caroço de algodão, grãos de girassol, pinhão manso, amêndoa do coco de babaçu, grão de amendoim, polpa de abacate, grãos de maracujá, caroço de oiticica e grãos de linhaça (GANDOLFI *et al.*, 2018). Todavia, em escala industrial a soja continua sendo a mais utilizada, dada sua importância para o agronegócio brasileiro e por seu desenvolvimento adequado dos aspectos econômicos, agronômicos, industriais e logísticos (SOUZA *et al.*, 2017), mesmo com os problemas gerados nas usinas, que ocorrem graças ao seu teor de fósforo e à baixa estabilidade à oxidação, que podem potencializar a formação de ácidos graxos e sabões, que causam depósitos em injetores de motores e entupimento dos filtros (TAPANES *et al.*, 2013).

Com isso, a composição de ácidos graxos do óleo pode influenciar seu uso como combustível, visto por exemplo, que em temperaturas baixas, os óleos relativamente saturados podem se tornar viscosos e até começar a se solidificar, limitando o uso de alguns óleos saturados como matérias-primas para biodiesel em condições de inverno, mas ainda podem ser usados no inverno em mistura com óleos não saturados, ou ainda como a única matéria-prima em outras estações, bem como durante o ano todo em regiões que não sofrem invernos severos. Óleos ricos em ácido oleico, como canola e soja, são fluidos suficiente para ter bom desempenho no inverno (GUPTA, 2012).

Atualmente, cerca de 30% do mercado global de biodiesel corresponde àquele produzido a partir de óleo de canola, o mesmo possui excelentes propriedades de desempenho (AUKEMA; CAMPBELL, 2011). Visto ainda que a canola apresenta um balanço energético positivo para produção de biocombustível, uma vez que para cada unidade de energia que entra no sistema são produzidas 2,84 unidades de energia (GAZZONI *et al.*, 2009), isso indica a viabilidade da produção de biodiesel a partir da canola (SILVA *et al.*, 2017).

Contudo, apesar de no mercado mundial os óleos de palma e de soja liderem a oferta na produção do biodiesel, na União Europeia a principal matéria-prima utilizada para a produção do biodiesel é o óleo de canola. Na Alemanha, as usinas produtoras utilizam o óleo de palma importado no verão e o óleo de canola ao longo do ano para atender a demanda interna, visto que o óleo de palma fica mais denso e reduz a eficiência da combustão com as baixas temperaturas do inverno europeu (OSAKI; BATALHA, 2011). Como o óleo de canola é muito utilizado para produção de biodiesel na Europa, surge uma oportunidade de mercado para produção de canola no Brasil, já que a produção de óleos da Europa é insuficiente para atender tal demanda (TOMM, 2006).

No entanto, o país apresenta pequena escala de produção desta oleaginosa, um dos atributos requeridos de uma fonte de biodiesel, tornando-a uma cultura secundária, onde não há

garantia da regularidade de oferta (VALE *et al.*, 2012). Ainda há dificuldades quanto a expansão de seu cultivo, devido às restrições climáticas e problemas com sua colheita (MICUANSKI *et al.*, 2014). Além disso, seu uso na produção biodiesel pode ser considerado incoerente por se tratar de um óleo nobre para a alimentação humana, rico em ácidos graxos poli-insaturados, benéfico e valorizado para a alimentação (SILVA; FREITAS, 2008), isso faz com que no Brasil, a canola seja utilizada, principalmente, como matéria-prima para a indústria de óleos de cozinha, sendo cultivada tradicionalmente como cultura de inverno, na entressafra da soja, pelos produtores do Paraná e Rio Grande do Sul (VALE *et al.*, 2012). Devido a importância de manter um suprimento adequado de óleo alimentar para o crescente mercado global, a longo prazo, a produção de biodiesel a partir de canola pode não ser viável, mesmo tendo comprovadamente a canola com alto teor de ácido oleico, que a torna uma matéria-prima atraente para a produção de biodiesel (MCKEON *et al.*, 2016). Porém, com o aumento da produtividade e em pesquisas voltadas à cultura da canola no Brasil, há um cenário positivo da sua utilização como matéria-prima para a produção de biocombustíveis (MICUANSKI *et al.*, 2014). Destacando que alternativamente, grãos de canola que sofreram excesso de chuva na colheita, seca, ou outros fatores que comprometem a qualidade para comercialização, podem ser usados na produção de biodiesel (MICUANSKI *et al.*, 2014).

Logo, ainda são poucos os estudos sobre sementes de canola e tecnologias que são úteis na produção de biocombustíveis (LUCAS *et al.*, 2016). Mas vale ressaltar, que seu óleo se caracteriza como um produto renovável, e que causa menos impactos ao meio ambiente, e ainda apresenta vantagens por possuir baixo conteúdo de enxofre, alto valor energético, reduzido conteúdo aromático e ser biodegradável. Assim, a canola representa uma cultura energética com crescente potencial na produção de biodiesel, e ainda a realização de pesquisas com a cultura, além de consolidar o potencial de produção de biocombustíveis, também fortalece o mercado alimentício e de produção de farelo e rações (MICUANSKI *et al.*, 2014).

2.1.4 Segmentação dos sistemas produtivos de canola no Brasil

No Brasil, o segmento predominante na unidade produtiva de canola é a empresa familiar, que apresenta variações graças ao tamanho das propriedades, que na maioria das vezes são maiores na região Centro-Oeste e menores no estado do Rio Grande do Sul (TOMM *et al.*, 2010; VALE *et al.*, 2012). Onde toda a produção é adquirida por cerealistas, cooperativas e outras empresas vinculadas às indústrias de extração de óleo, e apenas 1% dos grãos são usados na forma *in natura* na alimentação de pássaros (VALE *et al.*, 2012).

Os sistemas produtivos se diferem em termos de região de cultivo e manejo. Há duas ecorregiões de acordo com a região de cultivo, a Ecorregião 1, que enquadra os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e regiões centro-sul e oeste do Paraná, caracterizada por apresentar chuvas o ano inteiro e restrições devido a geadas durante o cultivo de canola; e a Ecorregião 2, que é composta pela região norte-nordeste do Paraná e região centro-oeste do Brasil, que possui precipitação decrescente a partir da época de semeadura e mínimos riscos de geadas durante o cultivo de canola (TOMM *et al.*, 2010; VALE *et al.*, 2012).

O que diferencia essas duas ecorregiões em termos de manejo, é quanto ao número de aplicações de inseticidas e a adubação de base e cobertura em cada uma delas. Na Ecorregião 1, há predominância de unidades produtivas com menor número de hectares do que na Ecorregião 2, é provável que o tamanho médio da área de cultivo de canola cresça na Ecorregião 2, após se ter maior conhecimento e consolidação da canola entre os agricultores que cultivam vários hectares de culturas de verão (TOMM *et al.*, 2010; VALE *et al.*, 2012).

Nos últimos anos, houve crescimento nas pesquisas, e o cultivo da canola vem se expandindo da região sul do Brasil para o sudoeste de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul. Assim como também houve aumento no ajuste de tecnologias, como a época de semeadura, e início da expansão do cultivo para regiões de altitude elevadas (800 a 1200 m) dos estados da região Sul, onde há alto risco de perdas por geadas. Em função da região em que se situa a produção de canola, há uma competição com milho safrinha de maior ou menor grau, se for maior o risco de perdas por geada, mais competitiva é a produção de canola em relação ao milho safrinha (TOMM *et al.*, 2010; VALE *et al.*, 2012).

Assim, o cultivo da canola no Brasil tende a crescer, graças a crescente demanda por alimentos saudáveis, alternativas ao consumo de combustíveis fósseis e a introdução de novas culturas nos sistemas de produção agrícola (GULARTE; MACEDO; PANOZZO, 2020), considerando ser uma ótima opção econômica para os produtores, e ainda pela enorme disputa pelo produto no mercado brasileiro e europeu (JÚNIOR *et al.*, 2017). Se seguir o caso da soja, em termos de pesquisa e desenvolvimento e a capacidade empreendedora vista com o cultivo da cultura no país, o Brasil pode se transformar em um grande produtor e exportador de canola (SEABRA JR. *et al.*, 2017).

2.2 Tropicalização da cultura da canola

O cultivo e as pesquisas com canola no Brasil começaram em 1974, no Rio Grande do Sul, depois no Paraná, na década de 80 e, posteriormente, em Goiás, em 2003 (TOMM, 2006). Ressaltando que no ano 2000, os híbridos Hyola 43 e Hyola 60 com resistência ‘vertical’ à doença canela preta, viabilizaram a expansão da área de cultivo de canola no Brasil (TOMM, 2007). A partir disso, com a crescente demanda, várias empresas e cooperativas trabalham para desenvolver e expandir cultivo de canola no país, visto que isso permite otimizar o uso de fatores de produção (máquinas e terra por exemplo) nos sistemas de produção de grãos, e ainda melhora o desempenho de culturas de inverno (TOMM, 2006).

Graças ao seu elevado potencial produtivo e às características da planta, é de grande interesse a expansão do cultivo da canola para a região Sudeste do Brasil, devido sua tolerância à seca observada no sul do país, e a possibilidade de utilizá-la em rotação de culturas (TOMM, 2007). Porém, em países como a China e a Austrália, as principais regiões produtoras de canola estão em latitudes entre 35° e 55° (TOMM, 2006).

Por isso, a tropicalização da cultura desenvolvida em climas temperados, com o desempenho acima do esperado nas baixas latitudes tropicais, é graças ao desenvolvimento de genótipos menos sensíveis a fotoperíodo e a escolha de regiões com altitudes acima de 600 m para se ter temperaturas mais amenas (TOMM, 2006). Visto principalmente que com o aumento das temperaturas e condições mais secas após a floração na cultura da canola, leva à redução do teor de óleo (PRITCHARD *et al.*, 2010). Assim, no Brasil se tem cultivado apenas canola de primavera, com baixa sensibilidade ao fotoperíodo (TOMM *et al.*, 2010), sendo possível produzir canola de forma satisfatória em baixas latitudes, desde que haja condições climáticas adequadas (RAPOSO *et al.*, 2016).

Com isso, mesmo que a cultura da canola se desenvolva com mais facilidade em regiões de clima temperado, com as temperaturas mais amenas, ela se adapta às mais diversas condições edafoclimáticas, desde que bem manejada. O que torna seu cultivo na região Centro-oeste uma boa opção como cultura de safrinha, se adequando no sistema de produção de grãos e constituindo mais uma alternativa na rotação de culturas (TOMM, 2006). Em seu trabalho, Araujo *et al.* (2019) confirmaram que a canola possui potencial para cultivo na região do Cerrado, mas é preciso mais estudos para sua implementação de fato, de forma sustentável e economicamente rentável.

Diante do exposto, alguns trabalhos têm buscado a tropicalização da canola no Brasil, como o de Panozzo *et al.* (2014), que avaliaram híbridos de canola em função de datas de

semeadura em Viçosa; Nery-Silva *et al.* (2017a), que avaliaram o desempenho agrônômico de genótipos de canola (*Brassica napus*) na região do Cerrado do Triângulo Mineiro, e em Uberlândia (NERY-SILVA *et al.*, 2017b); e ainda, trabalhos da Empraba Agroenergia, como o de Laviola *et al.* (2019), que analisaram a performance de genótipos de canola nas condições do Cerrado em Brasília, Distrito Federal. Portanto, o país pode se tornar um importante produtor e exportador de canola, principalmente se seguir o exemplo de pesquisa e desenvolvimento, e a capacidade empreendedora que há no cultivo de soja no Brasil (MICUANSKI *et al.*, 2014).

2.2.1 Épocas de semeadura

A canola é uma espécie de clima frio, que se desenvolve melhor em temperaturas amenas, mas é sensível a geadas intensas durante o crescimento inicial e a floração. Assim, é preciso evitar a semeadura em locais de acúmulo de frio (DALMAGO *et al.*, 2009). A cultura necessita de um solo úmido com temperaturas de 2 °C ou mais quentes para a germinação, início do crescimento radicular e emergência, sendo que as temperaturas ideais para a germinação e rápida emergência são 10 °C ou mais quentes (CANOLA COUNCIL OF CANADA, 2020). O processo de maturação das sementes de canola tem grande influência da temperatura, sendo que temperaturas entre 13 °C e 22 °C são ideais para a cultura, e temperaturas acima de 30 °C cessam o crescimento e desenvolvimento das plantas (HERTEL, 2012).

Observa-se ainda, que a semente de canola é muito pequena, levando mais tempo para que a cultura se estabeleça. Assim, em locais com solos frios, a semeadura tardia reduz o crescimento das plantas, tornando-as mais vulneráveis à ataque de insetos, doenças, lesmas e outras restrições; e em locais com clima quente e seco, a semeadura tardia resulta no amadurecimento da canola. E ainda, temperaturas elevadas durante o florescimento podem reduzir o número de sementes por vagem e diminuir o teor de óleo (POTTER, 2009). Assim, para garantir que as culturas floresçam no momento ideal buscando maximizar o rendimento, a data da semeadura e escolha de cultivares são os principais fatores de manejo que podem ser usados (LILLEY *et al.*, 2019).

Porém, como o cultivo comercial de canola é recente no país, há poucas informações sobre as exigências edafoclimáticas dos genótipos cultivados no Brasil, como por exemplo, a temperatura base inferior de crescimento e a soma térmica para os diferentes subperíodos de desenvolvimento, que são duas medidas muito importantes como referência na escolha de cultivares, e na definição de épocas e locais de semeadura (LUZ *et al.*, 2012).

Sabe-se que para cada região é essencial a escolha de uma cultivar de canola adequada, em função das condições e práticas de cultivo, e que a determinação da época de semeadura é crítica na sua produção em termos de rendimento de sementes e qualidade (TURHAN *et al.*, 2011). No Canadá, por exemplo, normalmente a semeadura tardia reduz o teor de óleo de 1 a 2%, quando comparado à semeadura antecipada, que geralmente produz canola de maior qualidade. O conteúdo de proteína e óleo tem relação inversa, assim, as sementes de canola semeadas antecipadamente tendem a ter menos proteína (CANOLA COUNCIL OF CANADA, 2020). Entretanto, há dificuldades em estabelecer as épocas de semeadura mais adequadas para cultivos de canola, ajustando a gestão de tecnologias destinadas à redução das perdas na cultura, sendo escassos os dados de óleo, qualidade e rendimento dos grãos de canola, em função das épocas de semeadura (RIGHI *et al.*, 2018).

Na escolha da melhor época para semeadura também é necessário observar o ciclo das variedades utilizadas. Híbridos de ciclo tardio possuem períodos mais curtos para semeadura, enquanto que híbridos precoces apresentam períodos mais prolongados. Assim, os híbridos de ciclos longos devem ser semeados primeiro, e depois os híbridos de ciclos precoces, proporcionando a otimização da estrutura de semeadura e a redução de riscos de geada na floração. Isso se deve ao fato de que, híbridos de ciclo tardio, se desenvolvem de forma mais lenta que aqueles de ciclo precoce, podendo facilitar a emissão de novas flores se forem atingidos por geada ou veranico na floração. Portanto, a semeadura tardia de híbridos precoce propiciará a floração em momentos com menos riscos, visto que os mesmos apresentam menor capacidade de recuperação da floração em caso de geada, e ainda, o seu desenvolvimento é mais rápido, podendo posicionar a floração antes do início das temperaturas elevadas, que podem ser prejudiciais (DALMAGO *et al.*, 2009).

Segundo um levantamento feito em 2015, a época com maior frequência de relatos de semeadura de canola em Minas Gerais (região de expansão de cultivo da cultura, com clima tropical) foi a primeira quinzena de abril, sendo também o de maior ocorrência no Paraná, seguido da segunda quinzena de abril. No Rio Grande do Sul, a primeira quinzena de maio e a primeira quinzena de junho foram os períodos de maior incidência de semeadura, sendo que esses dois últimos estados é onde se concentra a produção da oleaginosa no país (DE MORI *et al.*, 2019).

Dessa maneira, para que melhoristas desenvolvam cultivares com características fenológicas apropriadas para determinados ambientes, é preciso ter conhecimento do período ideal para começar a florescer em um local, para que assim, os produtores selecionem combinações de cultivares e datas de semeadura que diminuam o risco de estresse e maximizem

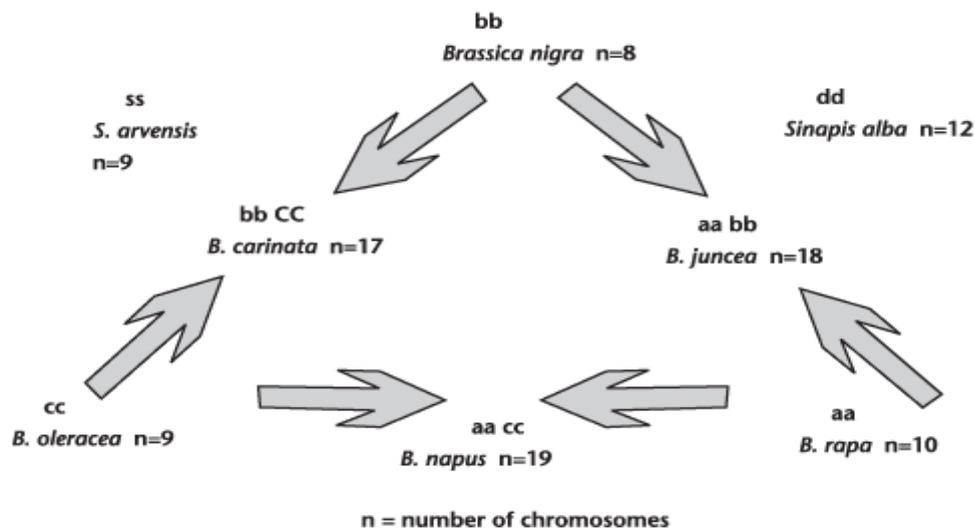
a produtividade (LILLEY *et al.*, 2019). Portanto, quando um produtor opta por certa época de semeadura, ele está escolhendo uma combinação entre a fenologia da cultura e a distribuição dos elementos do clima na região de produção, que poderá resultar em elevado ou baixo rendimento (PEIXOTO *et al.*, 2000). Logo, é necessário compreender a resposta das cultivares aos fatores climáticos para realizar a previsão precisa de períodos de semeadura de novas cultivares (LILLEY *et al.*, 2019).

2.3 Melhoramento genético da canola

Em culturas agrícolas, para que seja possível a expansão da área cultivada e o aumento das produtividades, com conseqüente aumento na produção nacional, é imprescindível a busca por cultivares mais produtivas e bem adaptadas às regiões de cultivo. Para isso, é importante conhecer sobre a diversidade genética, para direcionar os cruzamentos no melhoramento da espécie (KIIHL; TOMM, 2017). Tal variabilidade vista em caracteres agronômicos e características botânicas, deve ser conhecida e conservada, pois pode ser uma importante fonte de genes para os programas de melhoramento. (FIGUEIREDO *et al.*, 2004).

As brassicas normalmente conhecidas como colza, constituem um grupo de culturas de oleaginosas, que compreende seis espécies cultivadas, *Brassica nigra* ($2n = 16$, BB), *Brassica campestris/rapa* ($2n = 20$, AA), *Brassica oleracea* ($2n = 18$, CC) que são diplóides; e *Brassica juncea* ($2n = 36$, AABB), *Brassica napus* ($2n = 38$, AACC) e *Brassica carinata* ($2n = 34$, BBCC) que são tetraploides (GUPTA, 2012). A Figura 1 mostra as relações entre essas espécies, há cerca de 1.000 anos, originou-se *Brassica napus* (19 cromossomos) a partir de um cruzamento entre *Brassica rapa* (10 cromossomos) e *Brassica oleracea* (9 cromossomos) (CANOLA COUNCIL OF CANADA, 2020; SNOWDON; LÜHS; FRIEDT, 2007). Enquanto que a *Brassica juncea* originou de um cruzamento entre *Brassica rapa* (nabo) e *Brassica nigra* (mostarda preta). Para os melhoristas de canola, tais relacionamentos são importantes, visto que fornecem amplas fontes de características genéticas para fins de pesquisa (CANOLA COUNCIL OF CANADA, 2020).

Figura 1 - Relação entre as espécies de Brassicas.



Fonte: Disponível em: <https://www.canolacouncil.org/>. Acesso em: 12 jun. 2020

As primeiras cultivares de colza possuíam altos níveis de ácido erúxico e de glucosinolatos, considerados uma preocupação à saúde. Com isso, iniciou-se os programas de melhoramento de plantas no Canadá, onde foi identificada em 1959, uma linha de colza com baixos níveis de ácido erúxico (PRZYBYLSKI; ESKIN, 2011). A partir de um programa de retrocruzamento e seleção, obteve-se as primeiras cultivares com baixo teor de ácido erúxico, *Brassica napus*, em 1968 (denominada Oro) e *Brassica rapa*, em 1971 (denominada Span). E também ainda no final dos anos 50, foi identificada uma linha com baixo nível de glucosinolato, que, posteriormente, resultou na primeira cultivar de *Brassica napus* com baixo teor de ácido erúxico e de glucosinolato do mundo. Em 1974, houve a liberação da primeira cultivar de *Brassica rapa* (denominada Tower) com baixo teor de ácido erúxico e glucosinolato (CARLSSON *et al.*, 2007; CANOLA COUNCIL OF CANADA, 2020; PRZYBYLSKI; ESKIN, 2011).

No Brasil se tem cultivado a canola de primavera, da espécie *Brassica napus* L. var. *oleifera*, desenvolvida a partir do melhoramento genético convencional da colza (TOMM *et al.*, 2010). É uma espécie que apresenta cruzamento facultativo com um alto grau de autopolinização, mas na presença abundante de insetos polinizadores, pode haver uma maior proporção de polinização cruzada, e ainda, através da fertilização direcionada (usando por exemplo o macho estéril) é possível obter até 100% de cruzamentos (SNOWDON; LÜHS; FRIEDT, 2007).

No entanto, a produção manual de sementes híbridas de canola em grandes volumes é economicamente inviável. Dado que variedades de *Brassica napus* são principalmente

autopolinizadas, logo, a autopolinização das linhas mãe, deve ser controlada para viabilizar comercialmente a hibridação. Assim, os primeiros programas de sucesso usaram a macho esterilidade citoplasmática, permitindo a produção de plantas femininas de canola que não produziam pólen ou um pólen incapaz de promover a autofecundação. E só posteriormente a *Plant Genetic Systems* na Bélgica, através da biotecnologia, desenvolveu um novo sistema de hibridação (CANOLA COUNCIL OF CANADA, 2020).

Mesmo assim, observa-se que na América do Sul, as variedades de polinização aberta foram substituídas por híbridos, já que essas variedades tinham sensibilidade ao fotoperíodo, e assim, ciclo longo e desuniformidade na maturação, gerando perdas na colheita (TOMM, 2006). No Brasil, praticamente todas as lavouras usam os híbridos Hyola desde o fim dos anos 90. Sendo que antes dos prejuízos causados pela canela-preta, as sementes de canola eram importadas do Canadá, e hoje, são geradas na Austrália, em um programa de melhoramento genético que realiza a seleção para resistência ao grupo de patogenicidade de canela preta, de ocorrência no Brasil e no Paraguai. A produção dessas sementes híbridas nesse programa ocorre em diversos países como a Argentina, Austrália, Nova Zelândia e Chile. Existindo uma tendência em evitar a produção de sementes em países onde se tem cultivado canola transgênica, para diminuir riscos de contaminação, graças ao possível cruzamento com nabica e nabo forrageiro, que pode acarretar em plantas resistentes a herbicidas na América do Sul (TOMM *et al.*, 2010).

Enquanto que no Canadá, por exemplo, 90% da área de canola cultivada é transgênica, tecnologia adotada rapidamente pelos agricultores canadenses, e atualmente são testadas experimentalmente em campo, novas características transgênicas promissoras, como maior rendimento e teor de óleo (MÖLLERS, 2009). De acordo com Pua e Davey (2007), em busca de desenvolver plantas com alto rendimento e resistentes à patógenos é necessário aumentar o cultivo mundial de canola geneticamente modificada, e ainda, a canola cultivada em cultura de tecidos por exemplo, usada para fins de engenharia genética para realizar a introdução de vários genes, pode ser usada para melhorar a qualidade do óleo. Nesse sentido, Gupta (2012) relata que a incorporação de genes em cultivares de colza, como aqueles que governam a termossensibilidade e fotoinsensibilidade, e também uma melhor atividade fotossintética, poderiam levar seu cultivo a uma ampla variedade condições de cultivo, ajudando a aumentar a produção geral dessa importante oleaginosa.

É perceptível que a canola é uma das plantas que apresenta maior facilidade de manipulação genética na produção de óleos com diferentes composições de ácidos graxos (VALE *et al.*, 2012). Com isso, em busca de desenvolvimento de novos produtos, mantém-se

o foco na introdução de novas características para melhorar a qualidade do óleo e farelo. Como por exemplo, o desenvolvimento de novas cultivares chamadas HOLLi (com alto ácido oleico e baixo ácido linoléico) ou LowSat (com ácidos graxos com baixa saturação) (ABBADI; LECKBAND, 2011). Visto que normalmente a canola possui 62% de ácido oleico, 20% de ácido linoléico e 9% de ácido linolênico, sendo o ácido oleico monoinsaturado e relativamente resistente à oxidação, enquanto os ácidos linolênico e linoléico são poli-insaturados, e quanto mais insaturado é o óleo mais rápido ele oxidará e se tornará rançoso (POTTER, 2009).

Vale ressaltar, que a longo prazo, a demanda adicional na produção de canola vem do biodiesel, visto que em sua composição existe um ácido graxo quase ideal em termos de estabilidade e operacionalidade no inverno; e dessa forma, além da adaptação das cultivares e suas melhorias agronômicas, será preciso o desenvolvimento de variedades com alto rendimento de óleo (ABBADI; LECKBAND, 2011). Sendo que a qualidade e o rendimento da canola dependem principalmente da genética, das variedades em construção e das condições ambientais (SÜZER, 2015).

Devido a isto, nos últimos anos, em programas de melhoramento de canola, tornou-se alvo a criação de variedades de alto rendimento, principalmente em áreas com baixa disponibilidade hídrica, ambientes alagados e estresse térmico. Enquanto que em áreas de média à alta precipitação, as variedades alvo apresentam alto potencial de produção, maior área foliar, alta biomassa vegetal e atraso na maturação. Já as variedades com maturação precoce, copa menor, área foliar reduzida, são criadas para ambientes como o Mediterrâneo, para escapar à seca e ao calor, assim como no sudeste/oeste do Austrália, sul da Europa, Ásia Central, África do Sul e EUA (por exemplo, sul da Califórnia) e América do Sul; e ainda o enchimento rápido de grãos também pode ser usado como uma característica alvo para aumentar o rendimento de grãos nesses locais. No entanto, há um número limitado de programas de melhoramento com enfoque no desenvolvimento de variedades, especialmente híbridos (RAMAN *et al.*, 2019).

Portanto, é preciso grandes esforços na pesquisa de melhoramento de canola para resolver os problemas emergentes e futuros, e assim, permanecer com o progresso na qualidade e melhoria do rendimento nessas culturas. Há necessidade de estudos de mapeamento cromossômico, maior aplicação de técnicas de macho esterilidade citoplasmática e coleta, informatização, e criação de variabilidade genética (GUPTA, 2012). Torna-se necessário investimentos em programas de melhoramento genético, em busca de cultivares mais adaptadas às várias regiões de cultivo, propiciando aumento nos rendimentos médios e no potencial energético e econômico dessa cultura no Brasil (SILVA *et al.*, 2017).

2.4 Interação genótipos x ambientes

O fenótipo de um indivíduo é resultante da influência da sua constituição genética (genótipo), e do conjunto das condições que afetam seu crescimento e desenvolvimento (ambiente). Portanto, o fenótipo (F) constatado é obtido pela ação do genótipo (G) e do ambiente (A), ou seja, $F = G + A$ (RAMALHO *et al.*, 2012). Mas quando um mesmo indivíduo é avaliado em diferentes ambientes, seu fenótipo será influenciado pela interação genótipos x ambientes, que quantifica o comportamento diferencial dos genótipos diante das variações ambientais (CRUZ; CARNEIRO, 2006; RAMALHO *et al.*, 2012).

De acordo com Robertson (1959), citado por Cruz e Carneiro (2006), essas interações podem ser classificadas em simples e complexas. A primeira é dada pela diferença de variabilidade entre os genótipos nos ambientes, de maneira que não há mudança na classificação dos genótipos, e não traz complicações na recomendação de cultivares para o melhorista, já que o melhor genótipo em um ambiente, também é em outro. A segunda ocorre pela falta de correlação entre o desempenho dos genótipos, uma vez que estes apresentam diferentes respostas às variações ambientais, ocasionando uma alteração na sua classificação, considerando os diversos ambientes.

E ainda, a resposta dos genótipos quanto à variação ambiental pode ser dividida em previsíveis e imprevisíveis. As variações previsíveis incluem todos os caracteres constantes do ambiente, como o tipo de clima e solo, características ambientais que flutuam de forma sistemática, como o comprimento do dia, somadas ao que é determinado pelo homem, como densidade de semeadura, data de plantio, métodos de colheita e outras práticas agrônomicas. As variações imprevisíveis compreendem flutuações no clima, como quantidade e distribuição de precipitação e temperatura, dentre outros fatores. A distinção entre as duas categorias nem sempre é nítida e há variações de cultura para cultura, mas seus impactos são diferentes, tanto em procedimentos operacionais nos estágios de seleção dos programas de melhoramento, quanto nos estágios de testes (ALLARD; BRADSHAW, 1964).

Quando presente a interação genótipo x ambiente, o genótipo superior em um determinado ambiente não vai ser superior em outro ambiente, e na ausência de interação o genótipo superior em um ambiente será superior em todos (FALCONER; MACKAY, 1996). Com isso, na presença de interação, o trabalho dos melhoristas pode ser dificultado tanto na recomendação de cultivares quanto nos ganhos com a seleção em programas de melhoramento (CRUZ; REGAZZI, 1997; RAMALHO *et al.*, 2012). Assim, para agronomia e o melhoramento genético, os ensaios em vários ambientes são de suma importância no estudo de estabilidade de

produção, previsão do desempenho e produção de genótipos, e tratamentos agronômicos entre diferentes ambientes (VARGAS *et al.*, 2001).

No Brasil, bem como no Chile, as cultivares de canola comercializadas são originárias de outros países que apresentam condições ambientais diferentes, tornando o estudo de genótipos x ambientes muito importante (ESCOBAR *et al.*, 2011). Devido a isso, buscando manejar o efeito da interação genótipos x ambientes, é necessário realizar experimentos em um maior número de locais e anos possíveis, para assim, avaliar a interação e sua influência na seleção e recomendação de cultivares. Também é preciso um estudo detalhado sobre a adaptabilidade e a estabilidade das cultivares, e de seus caracteres importantes economicamente, para se ter uma recomendação mais segura. São utilizados e propostos muitos métodos estatísticos, bem como novos procedimentos vêm sendo apresentados, com o intuito de melhorar a interpretação da interação, devido a importância em fornecerem informações do desempenho de cada genótipo diante as variações do ambiente (SILVA, 2006).

Sendo assim, para reduzir a interação genótipo-ambiente existem três maneiras: identificar cultivares específicas para cada ambiente; realizar um zoneamento ecológico, agrupando os ambientes ecologicamente semelhantes para que a interação não seja significativa e, assim, avaliar o genótipo de maneira mais eficiente; e identificar cultivares com maior estabilidade fenotípica, por meio do emprego de análises de adaptabilidade e estabilidade (RAMALHO *et al.*, 2012; RAMALHO *et al.*, 1993)

2.5 Análise de trilha

Geralmente em programas de melhoramento, busca-se melhorar um caráter principal e ao mesmo tempo manter ou melhorar a expressão de outros caracteres. Assim, é importante o conhecimento da relação existente entre caracteres (LOPES *et al.*, 2002), principalmente para aqueles caracteres de baixa herdabilidade ou de difícil mensuração (CRUZ; REGAZZI, 1997). As estimativas de correlação genotípicas, fenotípicas, e de ambiente, permitem avaliar o comportamento de uma ou mais características (CRUZ; REGAZZI, 1997), mostrando ao melhorista como a seleção para um caráter influencia a expressão de outros caracteres (LOPES *et al.*, 2002), e ao compreender essas correlações entre os caracteres é possível realizar a seleção indireta, que pode levar a progressos mais rápidos do que a seleção direta no caráter desejado (CRUZ; REGAZZI, 1997).

Embora os coeficientes de correlação serem úteis, no entendimento de um caráter complexo, como o rendimento de grãos, os mesmos não exploram a importância relativa de

efeitos diretos e indiretos de caracteres que compõem caracteres complexos (NETO *et al.*, 2011). Essas estimativas podem não ser representativas da associação real entre dois caracteres, que podem sofrer interferência de outros caracteres, levando à distorção das estimativas de correlação (WRIGHT, 1921). Apenas a análise de causa e efeito possibilita uma melhor compreensão da associação que existe entre dois caracteres, e da interferência exercida de outros sobre esta associação (VENCOVSKY; BARRIGA, 1992). Desse modo, é necessário realizar o estudo da correlação em conjunto com a análise de trilha, para melhorar a compreensão da relação de causa e efeito entre diferentes pares de caracteres (BARASKAR *et al.*, 2015).

A análise de trilha foi desenvolvida por Wright (WRIGHT, 1921; WRIGHT, 1923), para realizar o estudo do desdobramento de coeficientes de correlação. Portanto, a análise de trilha compreende o estudo dos efeitos diretos e indiretos de caracteres sobre uma variável básica, sendo suas estimativas alcançadas através de equações de regressão onde as variáveis são previamente padronizadas. Essa análise pode ser realizada a partir de correlações genotípicas, fenotípicas ou ambientais (CRUZ; CARNEIRO, 2006).

Para interpretar os coeficientes de trilha, e assim tomar decisões mais adequadas no processo de seleção, é necessário levar em consideração alguns pontos: a) se a correlação constatada entre um caráter causal e o principal for igual ou semelhante ao seu efeito direto, em sinal e magnitude, a seleção indireta do caráter causal será eficiente, visto que esta correlação expressa a verdadeira associação entre tais caracteres; b) se o coeficiente de correlação for positivo, mas o efeito direto é insignificante ou negativo, tal correlação, é causada pelos efeitos indiretos, assim no processo de seleção esses efeitos devem ser considerados simultaneamente; c) se houver uma correlação irrelevante, mas com efeito direto alto e positivo, a falta de correlação é causada pelos efeitos indiretos, logo, no processo de seleção os fatores causais indiretos precisam receber atenção especial; d) se a correlação for declarada negativa, mas o efeito direto é alto e positivo, para eliminar os efeitos indiretos indesejáveis e aproveitar o efeito direto existente, é necessário aplicar um esquema seletivo restrito (VENCOVSKY; BARRIGA, 1992).

Ainda deve-se levar em consideração a multicolinearidade ou interrelação, ou seja, quando há uma correlação das variáveis entre si. Se presente de maneira moderada ou severa, em um dado conjunto de variáveis explicativas, dificulta-se a avaliação da influência destas sobre a variável principal, podendo levar a resultados errôneos, se ignorada. Assim, para viabilizar alguns estudos é necessário realizar diagnósticos de multicolinearidade, como por exemplo na análise de trilha que, para obtenção dos efeitos diretos e indiretos, é necessário uma

matriz bem condicionada, pois problemas com a multicolinearidade a tornam singular, tornando as estimativas de mínimos quadrados não confiáveis (CRUZ; CARNEIRO, 2006). Coimbra *et al.* (2005) estudando as consequências da multicolinearidade sobre a análise de trilha em canola, concluiu que a multicolinearidade severa superestima os valores dos coeficientes de correlações simples, e também os efeitos diretos sobre o caráter rendimento de grãos estimados através da análise de trilha.

Na literatura, alguns autores têm realizado a análise de trilha na cultura da canola (COIMBRA *et al.*, 2004; 2005; MARJANOVIĆ-JEROMELA *et al.*, 2008; KHAYAT; LACK; KARAMI, 2012; NADERI; TOORCHI, 2012; RAMEEH, 2016). Visto que a produtividade da cultura está relacionada com os componentes que afetam diretamente a produção, como número de siliques por planta, número de grãos por síliqua, massa de grãos e densidade de plantas (CANOLA COUNCIL OF CANADA, 2020). Desse modo, qualquer alteração que ocorre em quaisquer desses componentes, ou em outros de efeito indireto sobre a produtividade, podem propiciar mudanças na produtividade de grãos, assim como na arquitetura da planta e na uniformidade de maturação das siliques (KRÜGER *et al.*, 2011). Portanto, a análise de trilha é de grande importância no melhoramento genético de canola, principalmente no estudo do efeito desses componentes, e conseqüente aumento da produtividade da cultura.

2.6 Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é um tipo de espectroscopia vibracional que utiliza a energia de fótons (PASQUINI, 2003), empregando energia no comprimento de onda de 780 a 2500 nm (situado entre a região visível e a região infravermelha) (WORKMAN JR; SHENK, 2004). Seu objetivo é analisar uma amostra para obter informações qualitativas e/ou quantitativas resultantes da interação das ondas eletromagnéticas do infravermelho próximo com seus constituintes, possuindo então, grande potencial para ser utilizado em vários tipos de análises químicas e físicas (PASQUINI, 2003). É um método não destrutivo, que pode apresentar alta precisão e exige quase nenhuma preparação das amostras, e ainda comparativamente com a análise química tradicional, não faz uso de reagentes e não produz resíduos (BÜNING-PFAUE, 2003). Assim, suas principais vantagens compreendem suas análises não destrutivas, com uma rápida e direta operação do equipamento (FODOR *et al.*, 2011).

Tais técnicas baseadas em espectroscopia vibracional, como espectroscopia no infravermelho próximo, ganharam popularidade, principalmente pela busca de métodos rápidos

e rotineiros para a quantificação de várias substâncias em amostras de alimentos (FODOR *et al.*, 2011). Segundo Roberts *et al.* (2004) a soja e a canola dominam a literatura quanto às aplicações de NIR em oleaginosas, incluindo análises de gordura, composição ácida do óleo, umidade, composição de aminoácidos da proteína, e componentes de menor qualidade, como glucosinolatos, ácidos graxos livres e clorofila. Petisco *et al.* (2010) também relataram que essa tecnologia garante um bom desempenho na quantificação de óleo, proteína e glucosinolatos totais em amostras de sementes de *Brassica napus* e ou *Brassica carinata*; e ainda que a técnica acaba sendo bem adaptada para fins de reprodução no controle de qualidade nas fábricas de petróleo e na fabricação de rações, graças a velocidade da análise e pela não destruição das sementes durante o processo.

Com isso, dada a crescente relevância atual da cultura da canola e suas múltiplas aplicações, tornam-se necessárias calibrações robustas de NIR, para estimar com precisão a composição química em amostras heterogêneas. Sendo que a análise NIR em colza, num curto período de tempo pode propiciar de forma imediata o processamento de amostras após colheita, e assim realizar seleção de materiais de qualidade (PETISCO *et al.*, 2010). E ainda foram graças a essas análises qualitativas não destrutivas usando NIR, e avanços no desenvolvimento de soluções rápidas, que a capacidade de desenvolver uma canola de qualidade superior e outras variedades de Brassicas foi bastante aprimorada; a tecnologia NIR propiciou um aumento superior a dez vezes no número de amostras de qualidade analisadas a cada ano (SALISBURY; WRATTEN, 1999).

Porém, como o NIR é um método secundário, para prever propriedades do material analisado (como a composição química) necessita de uma calibração em relação aos dados de referência (obtidos por um método primário) (SANDAK; SANDAK; MEDER, 2016). Os espectros são coletados em um conjunto de amostras de calibração, as análises químicas são inseridas no computador para efeito de calibração e uma regressão é ajustada (ROBERTS *et al.*, 2004). Esses espectros NIR, a princípio são capazes de fornecer informações da composição química das amostras, como teor de óleo, umidade, proteína, sacarose e outros (PASQUINI, 2003). Todas baseadas na flexão e no alongamento das ligações C-H, O-H e N-H contidas nos compostos orgânicos (WORKMAN JÚNIOR; SHENK, 2004).

Essas informações contidas nos espectros são de grande complexidade, abrangendo várias centenas a milhares de variáveis, e ainda há espectros com bandas muito sobrepostas ou bandas espectrais fracas. Portanto, para amplificar as informações de interesse, interpreta-las e reduzir as informações indesejáveis nos espectros, é necessário o uso de quimiometria (LOHUMI *et al.*, 2015). A calibração e classificação multivariada são duas importantes

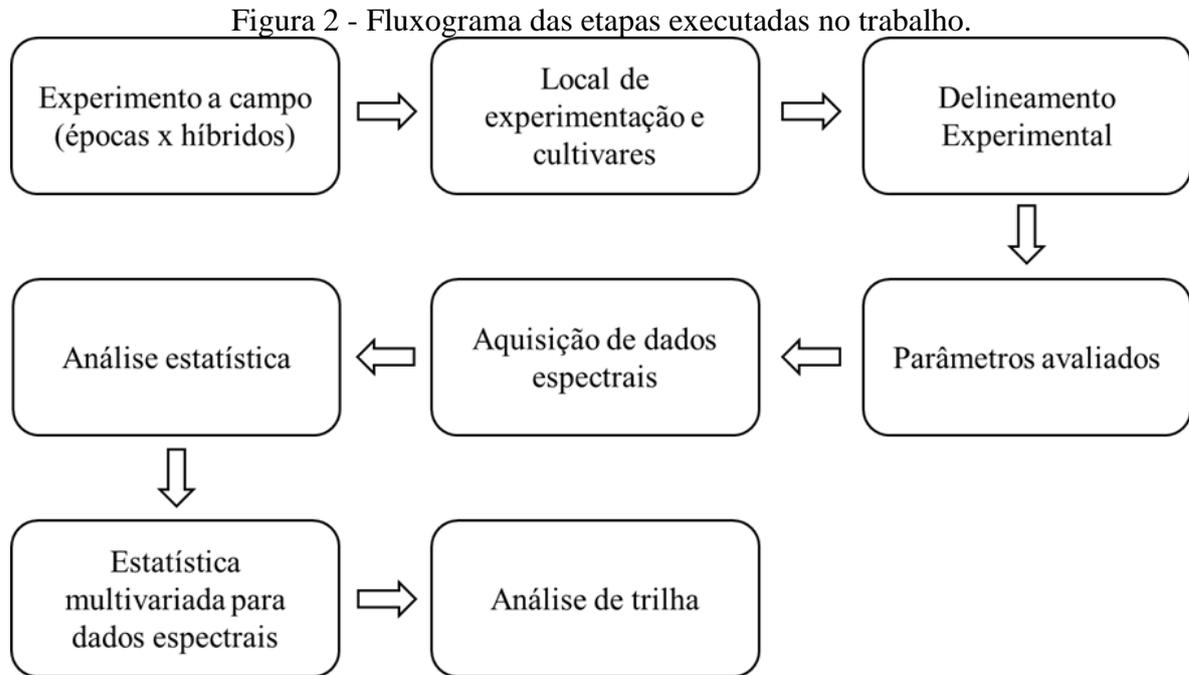
metodologias quimiométricas bastantes utilizadas (POREP *et al.*, 2015), e para se ter modelos quimiométricos confiáveis é muito importante que os dados de referência tenham alta qualidade (SANDAK; SANDAK; MEDER, 2016). Visto que durante a calibração, é feita uma correlação dos espectros e os parâmetros químicos/físicos (determinados pelo método de referência) (FODOR *et al.*, 2011), com o objetivo de estabelecer uma regressão linear múltipla, entre os dados do espectro e os parâmetros químicos do conjunto de amostras analisado (BÜNING-PFAUE, 2003). E assim o erro de previsão pela espectroscopia NIR pode estar relacionado com o erro do método de referência (SANDAK; SANDAK; MEDER, 2016).

Essa análise multivariada dos dados geralmente se inicia com um conjunto de dados espectrais brutos, os mesmos passam por alguma transformação matemática até finalmente serem processados para produzirem modelos analíticos qualitativos ou quantitativos. Essa etapa tem como objetivo a remoção ou minimização das fontes de variabilidade espectral (incluindo ruído), que estão presentes nos dados e não estão associados ao objetivo dos modelos, e melhorar a seletividade (PASQUINI, 2018). Desse modo, o NIR depende de um modelo multivariado para quantificar uma propriedade ou concentração em amostras complexas, como gasolina e produtos agrícolas (soja, farinha de trigo e cana-de-açúcar) (PASQUINI, 2003).

A etapa final no desenvolvimento de um modelo quantitativo é a validação (PASQUINI, 2003). É feita a medição da composição química de amostras desconhecidas usando um conjunto de amostras teste ou de validação. Se a precisão não for aceitável, repete-se o processo, com a inclusão na calibração de uma variação mais ampla nas amostras e verifica-se duas vezes a precisão do laboratório usado para os resultados (ROBERTS *et al.*, 2004). Assim, após realizar a calibração de determinado material por espectroscopia, é imprescindível validar o modelo, com objetivo de determinar a reprodutibilidade de uma calibração multivariada, a robustez a longo prazo e seu viés contra um método conhecido (GEMPERLINE, 2006).

3 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 2 apresenta um resumido fluxograma das etapas realizadas no presente trabalho, que serão descritas a seguir.



Fonte: Do autor (2021).

3.1 Local de experimentação e cultivares

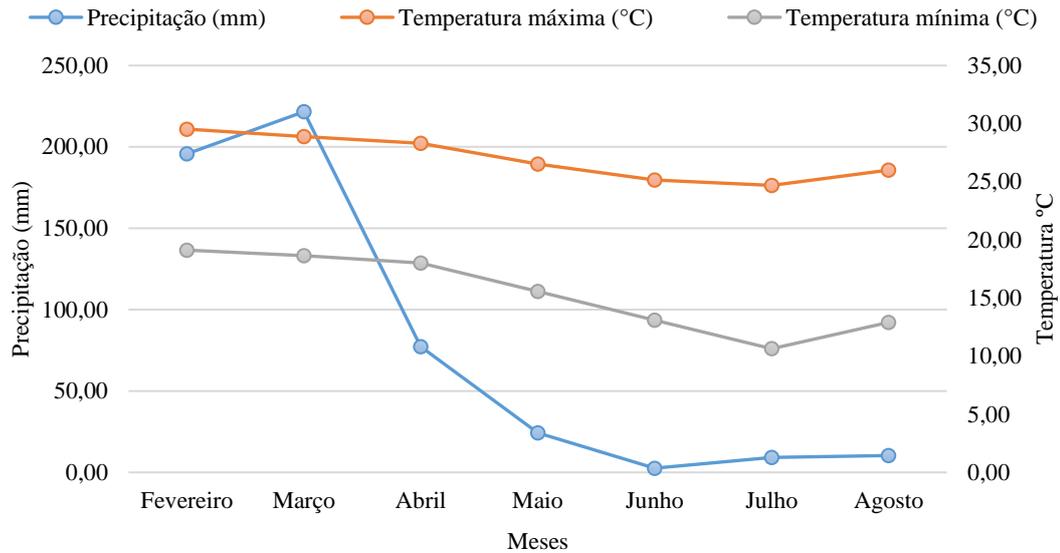
O experimento foi conduzido durante o ano de 2019, na Estação Experimental da Universidade Federal de Lavras (UFLA) - Fazenda Muquém, localizada no município de Lavras (21° 14' 43" Sul e 44° 59' 59" Oeste, altitude de 919 metros), Mesorregião do Campo das Vertentes, Minas Gerais, Brasil.

A cultura da canola foi conduzida no sistema de plantio direto em Latossolo Vermelho Amarelo de textura argilosa, em uma região em que a classificação climática segundo Köppen é tipo Cwa (temperado chuvoso) com inverno seco e verão chuvoso; com temperatura média anual de 20,4 °C e a precipitação média anual é de 1433,3 mm. Dados referentes à climatologia e propriedades químicas do solo do ambiente experimental encontram-se nas Figuras 3 e Tabela 1.

Foram utilizados seis híbridos comerciais de canola (TABELA 2), escolhidos em função da disponibilidade/domínio de tais genótipos no mercado. Previamente à semeadura, foi

realizado um teste de germinação para avaliar germinação e vigor. Em janeiro, foi realizada a dessecação da área e, posteriormente, semeadura dos híbridos a partir de fevereiro (em diferentes épocas), utilizando-se a população de plantas recomendadas para a canola (40 plantas/m²) (TOMM *et al.*, 2009a).

Figura 3 - Variações mensais de temperatura e precipitação no período de fevereiro a agosto do ano de 2019, em Lavras - MG.



Fonte: INMET (2021).

Tabela 1 – Composição química do solo (0 a 20 cm) em Lavras - MG, no ano de 2019.

pH	K	P	Na	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	m	M.O.	P-rem
5,70	130,45	7,41	-	3,22	1,11	0,10	2,30	4,66	4,76	6,96	67,02	2,10	2,64	24,10

K - P: Extrator Mehlich 1; Ca - Mg - Al: Extrator KCl - 1 mol/L; H + Al: Extrator SMP; SB: Soma de Bases Trocáveis; CTC (t): Capacidade de Troca Catiônica Efetiva; CTC (T): Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0; V: Índice de Saturação de Bases; m: Índice de Saturação de Alumínio; Matéria Orgânica (M.O.): Oxidação; P-rem: Fósforo Remanescente.

Fonte: Do autor (2021).

Tabela 2 – Características dos híbridos utilizados e procedência.

Híbrido	Ciclo	Reação à Canela - preta	Destaques
ALHT B4	Longo	R. V. ¹	Boa sanidade e estabilidade de produção
Diamond	Precoce	R. P. ²	Grande potencial produtivo
Hyola 433	Precoce	R. P.	Grande potencial produtivo, mas exigente em adubação e solos férteis
Hyola 571 CL	Precoce	R. P.	Tolerância à herbicidas do grupo das imidazolinonas
Hyola 575 CL	Precoce	R. P.	Tolerância à herbicidas do grupo das imidazolinonas
Nuola 300	Precoce	R. P.	Produtividade elevada e ótima resistência a debulha na colheita

¹Resistência vertical, ²Resistência poligênica.

Fonte: Do autor (2021).

3.2 Condução do experimento e delineamento experimental

Utilizou-se o delineamento experimental de blocos ao acaso, em parcelas subdivididas, com quatro parcelas (épocas de semeadura, sendo 15 de fevereiro, 28 de fevereiro, 20 de março e nove de abril) e seis subparcelas (híbridos de canola), apresentando quatro repetições. A área experimental foi feita no sistema de plantio direto, sendo as subparcelas de cinco linhas (espaçamento de 0,20 m) com cinco metros de comprimento, totalizando 5 m², com uma população de 40 plantas/m² uniformemente distribuídas.

3.3 Características avaliadas

Com base em critérios adotados no Canadá e na Austrália (CANOLA COUNCIL OF CANADA, 2020), foram realizadas observações fenológicas de acordo com as definições que seguem:

- Início da floração: data em que 50% das plantas têm pelo menos uma flor;
- Fim da floração: data em que não restam mais flores, exceto em plantas atípicas;
- Altura da planta: altura média de cinco plantas representativas de cada parcela, aferida no momento da colheita, considerando desde a base até a extremidade superior dos ramos com síliquis;
- Data de maturação: data em que 50% das sementes mudaram para cor escura nas síliquis localizadas sobre o meio do rácimo principal das plantas.

Com isso, foram avaliados os dias em florescimento (DEF) e ciclo total (CT) dessas plantas. O número de plantas por área (estande) foi avaliado por ocasião da colheita, por meio

da contagem de todas as plantas da área útil. E ainda foi realizada a avaliação do rendimento de grãos com base na colheita de três fileiras centrais de plantas com 4 m de comprimento, excluindo 0,5 m das extremidades da bordadura, totalizando 2,4 m² de área útil. A colheita foi realizada manualmente, e as plantas mantidas em sacos secando ao ar até atingirem aproximadamente 10% de umidade. Em cinco plantas representativas de cada parcela foram feitas a contagem de número de síliquas (NS), número de grãos (NG) e número de grãos por síliqua (NGS). Em seguida, as amostras de grãos foram limpas com o auxílio de conjunto de peneiras, e foram aferidos o peso de 100 grãos (P100, g).

O teor de óleo nos grãos foi determinado no Laboratório de Biodiesel da UFLA; para tal, as amostras uniformes de sementes foram submetidas à secagem em estufa com ventilação forçada de ar sob 65 °C durante 48 h visando a uniformização da umidade. Após a secagem procedeu-se a moagem das sementes com casca e a determinação do teor de óleo. O farelo das sementes foi embalado em cartuchos de papel, na quantidade de 2 g por cartucho, em duplicata por unidade experimental. Na extração, adotou-se a metodologia descrita em IUPAC (1979), utilizando-se o sistema soxhlet e o solvente extrator éter de petróleo e o tempo de extração de 6 h. Após a extração os cartuchos foram mantidos em estufa a 60 °C por 24 h para completa evaporação do éter de petróleo.

3.3.1 Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR)

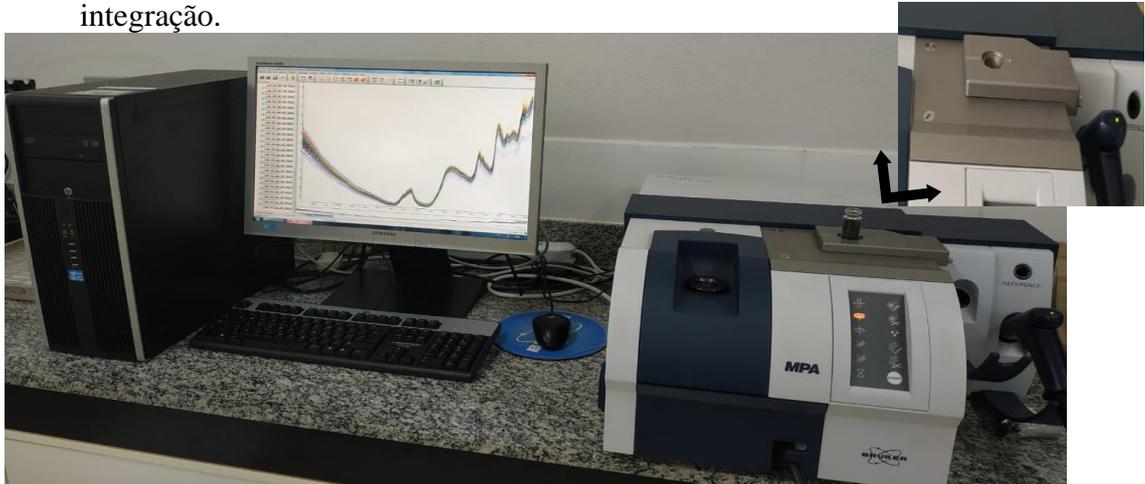
Também foi estabelecido um modelo multivariado para estimar o teor de óleo em grãos de canola com base assinatura em uma matriz de dados espectrais colhidos no infravermelho próximo (NIR, do inglês Near InfraRed). Uma vez que para quantificar uma propriedade ou concentração em amostras complexas, o NIR depende desse modelo multivariado (PASQUINI, 2003).

O material biológico utilizado no trabalho foram amostras de grãos provenientes das diferentes épocas de semeadura cultivadas no dado experimento, e ainda foram incluídos grãos dos híbridos Hyola 50, Hyola 61, Hyola 76, Hyola 433, ALHT B4, Hyola 571, Hyola 575 e Diamond, provenientes da Embrapa Agroenergia da safra 2018, totalizando nove diferentes genótipos de canola, para dar maior robustez ao modelo ajustado.

A aquisição espectral foi realizada em um espectrômetro da marca Bruker modelo MPA (FIGURA 4), em conjunto a um programa computacional Opus versão 7.5. Diretamente em amostras de grãos de canola, acondicionadas em cubetas de quartzo de 20 mL, por meio de uma

esfera de integração (FIGURA 4). A esfera de integração é um sistema de detecção de sulfureto de chumbo, que recebe o raio incidente após reflexão na amostra.

Figura 4 - Espectrômetro Bruker acoplado ao computador com destaque para a esfera de integração.



Fonte: Do autor (2021).

Os espectros foram obtidos a partir do modo de reflexão difusa, na faixa de 12.500 a 3.600 cm^{-1} , com resolução espectral de 8 cm^{-1} . O espectro de cada amostra foi obtido por meio da média de 16 varreduras, realizada em três diferentes porções de cada amostra de grãos.

3.3.2 Análise estatística

Os dados de produtividade, ciclo, dias em florescimento, altura de planta, estande, número de grãos em cinco plantas, número de síliquas em cinco plantas, número de grãos por síliqua foram submetidos à análise de variância em ambiente R (R CORE TEAM, 2015) pelo teste F, a 5% e 1% de probabilidade, como relatado por Steel, Torrie e Dicky (1997) ao utilizarem parcelas subdivididas.

3.3.2.1 Estatística multivariada para dados espectrais

Quanto aos dados espectrais coletados nos grãos de canola, foram realizadas análises multivariadas através do software *The Unscrambler*® (versão 9.7). A análise de componentes principais (PCA, do inglês *Principal Component Analysis*) foi inicialmente adotada, a fim de explorar previamente os dados e avaliar a similaridade espectral entre os materiais genéticos estudados

Visando estimar o teor de óleo de canola por meio de dados espectrais, foram ajustados modelos multivariados por meio do método da regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R, do inglês *Partial Least Squares Regression*), relacionando os dados espectrais obtidos no NIR e o teor de óleo previamente determinado pelo método químico tradicional. O número de variáveis latentes adotadas foi escolhido com base no menor erro padrão da validação e no maior coeficiente de determinação da validação (R^2_{cv}).

Os modelos foram validados pelos métodos de validação cruzada e validação independente (externa). A validação cruzada foi feita pelo método randômico, considerando 96 dados provenientes de 32 amostras de grãos. Nesse tipo de validação cada dado de calibração é retirado de cada vez e, então, constrói-se o modelo e estima-se a amostra retida, e é repetido para todos os demais dados. A validação independente foi baseada em dois conjuntos de dados, utilizando-se 24 amostras (72 dados) para o lote de calibração e 8 amostras (24 dados) para o lote de validação.

As calibrações foram feitas por meio de espectros originais e de espectros tratados matematicamente com primeira derivada, visando melhorar a relação sinal/ruído. Para calibração dos modelos para estimativa do teor de óleo das amostras foi aplicada a seleção de faixas espectrais pelo teste de incertitude de Martens (WESTAD; MARTENS, 2000). Assim, a faixa espectral adotada nesse estudo compreendeu o número de ondas entre 3600 a 9000 cm^{-1} . As amostras anômalas (outliers) foram detectadas por meio do gráfico resíduos de *student x leverage* e removidas dos modelos.

Os modelos foram avaliados pelo coeficiente de determinação (R^2_{cv} e R^2_p), raiz do erro padrão médio (RMSECV e RMSEP), e através de representação gráfica.

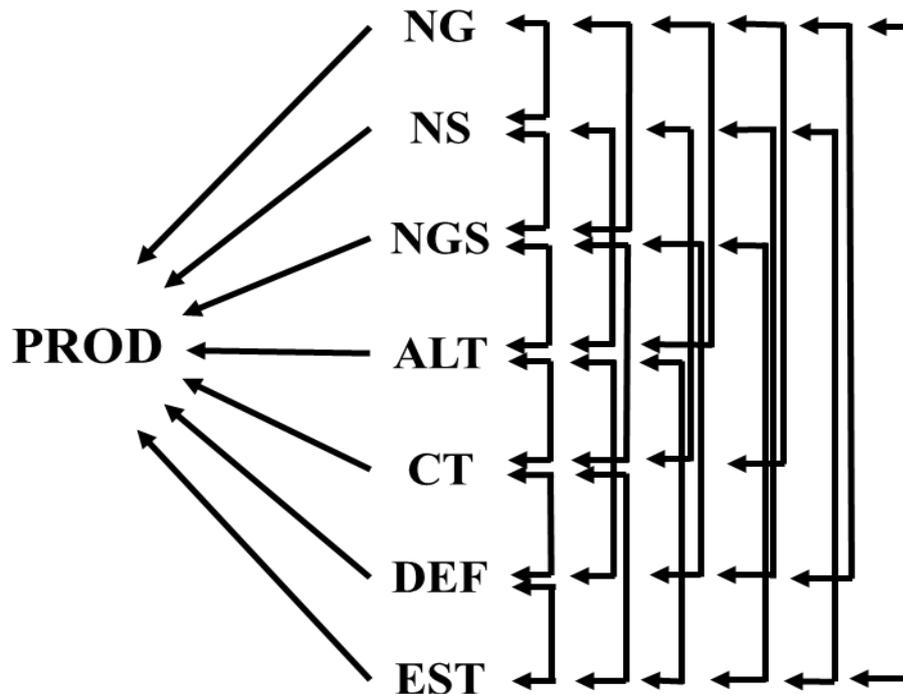
3.3.2.2 Análise de trilha

A análise de trilha foi realizada no programa computacional Genes (CRUZ, 2013). As matrizes de correlação entre os caracteres envolvidos foram estimadas e suas significâncias avaliadas pelo teste de Mantel. A multicolinearidade foi testada com base no número de condição da matriz (MONTGOMERY; PECK, 1981). Esse método considera o número de condições (NC) obtido pela razão do maior autovalor pelo menor autovalor da matriz de correlação. Se NC é menor que 100, a multicolinearidade é considerada fraca. Em caso de multicolinearidade moderada ($100 < NC < 1000$) ou forte ($NC > 1000$), sugere-se a eliminação de variáveis do modelo de regressão, preferencialmente aquelas que mais contribuem para a

multicolinearidade ou a adição de uma constante k na diagonal da matriz $X'X$, assim como no método de regressão em crista (CRUZ; REGAZZI, 1997).

A análise foi realizada a partir de um diagrama causal de uma cadeia (FIGURA 5), tendo como objetivo desdobrar as correlações em efeitos diretos e indiretos de variáveis explicativas sobre a variável principal produtividade de grãos.

Figura 5 - Diagrama causal de uma cadeia dos efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas número de grãos em cinco plantas (NG), número de síliquas em cinco plantas (NS), número de grãos por síliqua (NGS), altura (ALT, m), ciclo total (CT), dias em florescimento (DEF) e estande (EST) sobre a variável principal produtividade de grãos (PROD).



Fonte: Do autor (2021).

A decomposição da correlação entre as variáveis explicativas e a variável básica é dada por Cruz (2006):

$$r_{iy} = p_i + \sum_{j+1}^n p_j ir_{ij} \quad (1)$$

Em que:

r_{iy} é a correlação entre a variável principal (y) e a i-ésima variável explicativa;

p_i é a medida do efeito direto da variável i sobre a variável principal;

$p_j ir_{ij}$ é a medida do efeito indireto da variável i, via variável j, sobre a variável principal.

Também foram obtidas nesta análise, as estimativas do coeficiente de determinação do modelo e o efeito da variável residual sobre a variável principal.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de variância

A partir da análise de variância envolvendo as diferentes épocas de semeadura e híbridos, observou-se boa precisão experimental (TABELA 3). O coeficiente de variação (CV) variou de 5,11% (ciclo total) a 32,36% (número de grãos por planta). Segundo Gomes (2009) tal coeficiente permite inferir acerca da precisão do experimento. Sendo considerados baixos valores menores que 10%, médios valores entre 10 a 20%, altos quando variam de 20 a 30% e muito altos quando superiores a 30%. Logo, quanto menor o coeficiente de variação, maior a precisão do experimento (BANZATTO; KRONKA, 2006). Deve-se ressaltar, contudo, que o elevado CV detectado em alguns caracteres é aceitável, por ser decorrente da própria natureza quantitativa desses componentes, que sofrem forte influência do ambiente (LEITE *et al.*, 2015).

Tabela 3 – Resumo da análise de variância referente à avaliação de híbridos de canola em Lavras/MG, no ano de 2019. Lavras - MG, 2021.

FV	GL	Pr>Fc							
		PROD	NS	NG	NGS	ALT	CT	DEF	EST
Época (E)	3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0093	0,0205	0,0000	0,0000	0,1256
Híbrido (H)	5	0,0000	0,0005	0,0883	0,0148	0,0916	0,0092	0,0000	0,0040
E x H	15	0,0000	0,0000	0,0000	0,0677	0,4956	0,0025	0,0000	0,0091
Média geral		1370,62	673,46	10264,50	15,24	1,38	117,59	51,80	412165,64
CV 1 (%)		14,87	26,48	24,20	15,27	21,57	5,11	10,84	24,37
CV 2 (%)		17,09	23,39	32,36	17,81	19,67	6,93	8,08	24,20

PROD: produtividade, kg ha⁻¹; NS: número de siliquas em cinco plantas; NG: número de grãos em cinco plantas; NGS: número de grãos por siliqua; ALT: Altura, m; CT: ciclo total, dias; DEF: dias em florescimento, dias; EST: estande, número de plantas/ha.

Fonte: Do autor (2021).

Corroborando com parte desses resultados, Laviola *et al.* (2019) avaliando a performance de genótipos de canola no Cerrado, observaram valores de CV próximos de 10%, com exceção para as variáveis número de dias para emergência de planta, produtividade de grãos e rendimento de óleo que apresentaram valores acima de 20%. Rosa *et al.* (2020a) ao estudarem a influência de épocas de semeadura sobre híbridos de canola, também observaram valores de CV próximos ao dado estudo, para duração da floração e ciclo. Assim como Rigon *et al.* (2017), encontraram valores mais altos de CV para o número de siliquas por planta, ao estudar características agrônômicas, rendimento de óleo e proteína de canola em diferentes épocas de semeadura.

Foi detectada diferença entre as épocas de semeadura para quase todos os caracteres avaliados, exceto para o estande de plantas (EST). Arrúa *et al.* (2014), também não observaram diferenças significativas no número de plantas por área obtido em seu experimento avaliando o desempenho agrônômico de dois híbridos de canola, em função de diferentes épocas de semeadura na região de Marechal Cândido Rondon, oeste do Paraná, corroborando com tais resultados. Um dos maiores desafios da canola é o estabelecimento do estande (ASSIS *et al.*, 2020). Tomm *et al.* (2009a) indicam uma população de 40 plantas/m², para assegurar um número adequado de plantas que permita maior potencial de rendimento, compensando o dano de insetos, e cobrindo o solo rapidamente para reduzir a presença de plantas daninhas. Assim, determinado resultado já era esperado, visto que foram realizados testes de germinação nas sementes de forma preliminar, e o plantio foi estabelecido de acordo com estande ideal, resultando em uma população em média de 41,2 plantas/m².

A diferença observada nos demais componentes de produção entre as épocas de semeadura podem ser justificadas pelas temperaturas iniciais mais elevadas e redução no volume de precipitações nas épocas finais (FIGURA 2), visto que umidade e a temperatura são as variáveis ambientais mais importantes na regulação do crescimento e desenvolvimento da cultura (CANOLA COUNCIL OF CANADA, 2020). Uma vez, que a restrição hídrica atua reduzindo a velocidade de processos fisiológicos e bioquímicos, fazendo com que as plântulas de canola nas condições de baixa umidade tenham menor desenvolvimento e menor acúmulo de biomassa seca (DA COSTA *et al.*, 2020); e temperaturas acima de 30 °C cessam o crescimento e desenvolvimento das plantas, com temperaturas ideais para a cultura entre 13 °C e 22 °C (HERTEL, 2012).

No Rio Grande do Sul, por exemplo, segundo Tomm (2007), a canola expressa seu maior potencial de rendimento quando semeada em meados de abril, e a cada dia de atraso na semeadura após esta data ocasiona na queda de rendimento da cultura. Enquanto que na região de Dourados-MS, estudos com os híbridos Hyola 411 e Hyola 433, denotam destaque na produtividade em semeadura mais tardia, em meados de maio (ITO *et al.*, 2014).

Portanto, a época de semeadura afeta os componentes de produção da canola (BOTTEGA *et al.*, 2020; DA COSTA *et al.*, 2020; DAHMER *et al.*, 2017), influenciando desde seu crescimento e estágios fenológicos (RAPOSO *et al.*, 2016; ROSA *et al.*, 2020a), até a produção de grãos (DAHMER *et al.*, 2017) e seu teor de óleo (RIGON *et al.*, 2017).

Em contrapartida, não foram observadas diferenças estatísticas entre os híbridos para o número de grãos em cinco plantas (NG) e altura das plantas (ALT). As diferenças nos demais caracteres avaliados, possivelmente são a esperada expressão das diferentes características dos

híbridos, sendo que Diamond, Hyola 433, Hyola 571CL, Hyola 575CL e Nuola são híbridos de ciclo precoce, e ALHT B4 de ciclo longo, e cada um com potenciais de rendimento diferentes. Corroborando com parte desses resultados, Rosa *et al.* (2020a) verificaram diferença no desempenho agrônômico de híbridos de canola ao estudar a influência de épocas de semeadura sobre eles, concluindo que os híbridos o Hyola 50, seguido pelo Hyola 61 e Hyola 433 são respectivamente os híbridos com o melhor desempenho agrônômico, independente da época de semeadura.

Resultados semelhantes para altura foram encontrados por Jasper e Polanski (2019), em que a altura das plantas não diferiram estatisticamente ao avaliarem épocas de semeadura em diferentes híbridos de canola, com média de 1,25 m. Assis *et al.* (2020) também não encontraram diferenças estatísticas para o caráter altura ao avaliarem o desempenho de cinco híbridos de canola em três épocas de semeadura em Jataí-GO. Porém, diferentes resultados foram encontrados por Rigon *et al.* (2017), que observaram diferenças nas alturas dos híbridos de canola ao estudarem características agrônômicas, rendimento de óleo e proteína de canola em diferentes épocas de semeadura. Dahmer *et al.* (2017) também observaram diferenças na altura de dois híbridos ao estudarem efeito de épocas de semeadura sobre seu desempenho, onde o híbrido Hyola 433 resultou em plantas maiores para todas as épocas.

Foi constatado diferenças significativas na interação época x híbrido para a maioria dos caracteres avaliados, exceto para o número de grãos por síliqua (NGS) e altura (ALT). Esses resultados permitem inferir que o comportamento dos híbridos não foi coincidente para quase todos os caracteres nos diferentes ambientes avaliados. Na literatura, são reportados outros trabalhos realizados para a cultura da canola nos quais também ocorreu interação genótipo x ambiente (BOTTEGA *et al.*, 2020; GARCIA *et al.*, 2017; LIMA *et al.*, 2017; RAPOSO *et al.*, 2016; RIGON *et al.*, 2017); assim como em outras culturas oleaginosas, como o girassol (MACHADO *et al.*, 2020) e o gergelim (MALI *et al.*, 2015).

4.2 Análise de trilha

A existência de variação entre os híbridos possibilita a quantificação de possíveis correlações entre os caracteres de produção. O que é muito importante no melhoramento genético de plantas, já que o estudo dessas correlações auxilia no entendimento dos componentes de produção, e ainda ajudam o melhorista durante a seleção, que pode utilizá-la como ferramenta para seleção indireta (CASTRO *et al.*, 2019).

Porém, ao avaliar múltiplos caracteres, torna-se necessário o emprego de métodos estatísticos para auxiliar no melhor entendimento do inter-relacionamento desses caracteres. E ainda, tais inferências podem ser prejudicadas no caso de ocorrência de multicolinearidade. A partir do teste sugerido por Montgomery e Peck (1981), foi verificada a ocorrência de multicolinearidade moderada ($100 < NC < 1000$). Com isso, uma forma de minimizar o problema é a retirada de caracteres redundantes.

Ao analisar as correlações entre os caracteres, observou-se alta correlação entre o número de grãos em cinco plantas e o número de síliquas (0,96). Logo, optou-se pela retirada do caráter número de síliquas. Após isso, ao realizar o teste novamente, observou-se multicolinearidade fraca. Desse modo, as estimativas dos coeficientes de correlações simples ou fenotípicas avaliadas para os sete caracteres de importância agrônômica para a cultura de canola estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficientes de correlação entre sete caracteres agrônômicos, avaliados em híbridos de canola em Lavras - MG, no ano de 2019. Lavras - MG, 2021.

Caracteres	NG	NGS	ALT	CT	DEF	EST	PROD
NG	1	0,4426*	0,3001	-0,7614**	-0,2949	0,1644	0,6857**
NGS		1	-0,0893	-0,3404	-0,2132	0,0339	0,1361
ALT			1	-0,4033*	-0,3356	0,2014	0,4943*
CT				1	0,6074**	-0,5476**	-0,7848**
DEF					1	-0,5936**	-0,4520*
EST						1	0,3346
PROD							1

*Significativo ao nível de 5% pelo teste de Mantel.

**Significativo ao nível de 1% pelo teste de Mantel.

PROD: produtividade, kg ha⁻¹; NG: número de grãos em cinco plantas; NGS: número de grãos por síliqua; ALT: Altura, m; CT: ciclo total, dias; DEF: dias em florescimento, dias; EST: estande, número de plantas/ha.

Fonte: Do autor (2021).

Segundo Nogueira *et al.* (2012), ao interpretar tais correlações devem ser considerados três aspectos: magnitude, direção e significância. Uma vez que os valores do coeficiente de correlação variam de -1 a +1, onde o sinal indica direção positiva ou negativa da relação entre as variáveis e o valor sugere a força dessa relação, logo, quanto mais próximo a magnitude da estimativa da correlação destes valores, há associação forte entre dois caracteres (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JR., 2009; RAMALHO *et al.*, 2012). Assim, estimativas de coeficiente de correlação positivas indicam a tendência de uma variável aumentar quando a outra aumenta, e correlações negativas indicam tendência de uma variável aumentar enquanto a outra diminui (NOGUEIRA *et al.*, 2012).

De forma geral, observa-se que os caracteres NG (0,6857) e ALT (0,4943) apresentaram maiores estimativas de correlação positiva e significativa com a PROD. Tais valores positivos foram superiores aos estimados para os demais caracteres avaliados neste estudo; sugerindo que esses caracteres contribuíram para o aumento da produtividade em canola.

Krüger *et al.* (2011) encontraram resultado semelhante para o caráter número de grãos por planta, que apresentou maior correlação direta e positiva com a produtividade de grãos, juntamente com o número de siliquas. Resultados semelhantes também foram obtidos por Khayat, Lack e Karami (2012) e Marjanović-Jeromela *et al.* (2008), que analisando a correlação entre algumas características agrônômicas na cultura da canola, observaram alta correlação positiva e significativa da altura com a produtividade, corroborando com os resultados do presente estudo.

Observa-se ainda, estimativas de correlação positiva e significativa entre os pares NG e NGS, CT e DEF. Com isso, plantas que apresentam um maior número de grãos tendem a possuir número de grãos por síliqua também superiores. O mesmo raciocínio se aplica a plantas de maiores ciclos que tendem a possuir períodos de floração maiores, explicado pela correlação fenotípica significativa positiva que ocorreu entre os pares observados. Rosa *et al.* (2020b) confirmaram em seu estudo, que o prolongamento da floração foi o principal fator responsável para estender o ciclo da cultura da canola.

Essas correlações podem ser causadas por ligação dos genes que controlam os caracteres, sua magnitude é influenciada pela distância entre os genes nos cromossomos, podendo ser positiva ou negativa, de acordo com a presença de alelos favoráveis ou desfavoráveis nos genes ligados (RAMALHO *et al.*, 2012). O pleiotropismo também é uma das causas para altas correlações, no qual um mesmo gene influencia na expressão de mais de um caráter (FALCONER; MACKAY, 1996). Tal informação se torna útil no melhoramento de plantas, ao favorecer a seleção simultânea de dois ou mais caracteres, a partir da seleção em apenas um deles (NOGUEIRA *et al.*, 2012). Portanto, abrindo a possibilidade de seleção indireta a partir dos caracteres NG e ALT, o que irá resultar em ganhos na produtividade na cultura da canola.

Observa-se que os valores das correlações variaram de 0,0339 a 0,6857. O caráter NGS (0,1361 – não significativo) obteve a menor estimativa do coeficiente de correlação com a PROD, assim como EST apresentou uma correlação não significativa com PROD de 0,3346. Segundo Coimbra *et al.* (2005), a ausência de correlação significativa entre os caracteres componentes do rendimento (como NGS), com a PROD, pode ser explicada pela compensação

que a canola frequentemente promove, ao aumentar ou reduzir o peso dos grãos em função do número de grãos por síliqua e do número de síliqua por planta em desenvolvimento.

Por outro lado, os caracteres CT (-0,7848) e DEF (-0,4520) se associaram negativamente com o PROD e com a maioria dos outros caracteres, mostrando que a redução do ciclo e da fase de florescimento na canola podem resultar em maiores produtividades. Resultados diferentes obtidos por Coimbra *et al.* (2004) mostram associação positiva entre o ciclo total e a produtividade de grãos. Enquanto Krüger *et al.* (2014) observaram que a variável tempo de duração da floração, apresenta relação negativa com a produtividade de grãos nos três espaçamentos estudados, assim como ocorreu no presente estudo.

Genótipos de canola com ciclo curto se tornam uma excelente alternativa econômica, já que a cultura pode se beneficiar dos períodos finais das chuvas, reduzindo a necessidade de irrigação, e ainda favorecendo sua incorporação no sistema de produção. Contudo, apesar da procura por híbridos precoces ser maior, por possibilitarem esse melhor gerenciamento de tempo e recursos na propriedade (ROSA *et al.*, 2020a); segundo Tomm *et al.* (2010) genótipos de ciclo médio e tardio tendem ao maior potencial de rendimento, justamente por apresentarem um período maior para aproveitar mais dos recursos ambientais e realizar mais fotossíntese, e por possuírem mais tempo para compensar condições que possam limitar sua produção, já que apresentam também período de floração mais longo, permitindo até certo ponto, emitir novas flores, que podem compensar prejuízos causados por geadas e estresses hídricos.

E ainda, tratando-se do teor de óleo nos grãos, Krüger *et al.* (2014) afirmam que a diminuição do ciclo deve ser vista com cuidado. Já que tal redução acentuada resulta em menor área foliar e menor produção de fotoassimilados para formação de lipídios, enquanto que um aumento do ciclo acarreta em maior gasto de manutenção, sobrando menor quantidade de fotoassimilados para serem translocados durante o enchimento de grãos. Com isso, tanto a redução acentuada, quanto aumento excessivo do ciclo, podem ser prejudiciais para teor do óleo, visto que há maior gasto energético para a formação do óleo quando comparado para a formação do restante dos grãos.

Entretanto, uma alta correlação não implica em uma relação de causa e efeito entre as variáveis analisadas, apenas a análise de trilha permite uma melhor compreensão da associação que existe entre dois caracteres, e da interferência exercida de outros sobre esta associação (VENCOVSKY; BARRIGA, 1992). Desse modo, é necessário realizar o estudo da correlação em conjunto com a análise de trilha, para melhor compreender a relação de causa e efeito entre diferentes pares de caracteres (BARASKAR *et al.*, 2015). Em função disso, foi realizada a

análise de trilha que estuda o desdobramento desses coeficientes de correlação, em efeitos diretos e indiretos de caracteres sobre uma variável básica (CRUZ; CARNEIRO, 2006).

As estimativas dos efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas sobre o caráter PROD são apresentados na Tabela 5. O somatório dos efeitos diretos e indiretos resulta no coeficiente de correlação. A soma dos efeitos diretos multiplicados por suas respectivas correlações resulta no coeficiente de determinação (R^2), e a raiz da diferença ($1 - R^2$), resulta no Efeito da Variável Residual (P_E), que retornaram 0,6974 e 0,5501, respectivamente, indicando que as variáveis explicativas determinaram, de forma parcial, a variação da variável básica (PROD). Contudo, é oportuno destacar que apesar do coeficiente de determinação não ser considerado baixo, o efeito residual foi de certa forma, de alta magnitude.

Tabela 5 - Efeitos diretos e indiretos das variáveis explicativas sobre a produtividade de grãos referente à avaliação de híbridos de canola em Lavras/MG no ano agrícola de 2019. Lavras - MG, 2021.

Variável	Efeito sobre a PROD						TOTAL
	via NG	via NGS	via ALT	via CT	via DEF	via EST	
NG	0,2494	-0,0780	0,0479	0,4688	0,0136	-0,0160	0,6857
NGS	0,1104	-0,1762	-0,0142	0,2096	0,0098	-0,0033	0,1361
ALT	0,0748	0,0157	0,1595	0,2483	0,0155	-0,0196	0,4943
CT	-0,1899	0,0600	-0,0643	-0,6157	-0,0280	0,0532	-0,7848
DEF	-0,0735	0,0376	-0,0535	-0,3740	-0,0461	0,0576	-0,4520
EST	0,0410	-0,0060	0,0321	0,3372	0,0274	-0,0971	0,3346
COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO (R^2)							0,6974
EFEITO DA VARIÁVEL RESIDUAL (P_E)							0,5501

PROD: produtividade, kg ha⁻¹; NG: número de grãos em cinco plantas; NGS: número de grãos por síliqua; ALT: Altura, m; CT: ciclo total, dias; DEF: dias em florescimento, dias; EST: estande, número de plantas/ha.

Fonte: Do autor (2021).

Os caracteres que, de forma geral, apresentaram estimativas de efeito direto positivo sobre a produtividade de grãos foram NG (0,2494) e ALT (0,1595). Muito embora de baixa magnitude evidenciou-se estimativas de correlação positiva significantes. Vencovsky e Barriga (1992) afirmam que, se o coeficiente de correlação for positivo, mas o efeito direto é insignificante ou negativo, tal correlação, é causada pelos efeitos indiretos, assim, no processo de seleção, esses efeitos devem ser considerados simultaneamente. A seleção praticada para essas características pode contribuir diretamente para o aumento da produtividade de grãos. A variável indireta CT que apresenta maior efeito indireto sobre NG e ALT, deve ser considerada simultaneamente.

Estudos realizados por Rocha *et al.* (2019) denotam que na decomposição dos efeitos diretos e indiretos dos componentes produtivos sobre a produtividade de grãos em genótipos de

canola, houve maior efeito das variáveis número de grão por síliqua e o rendimento de óleo, apresentando influência direta positiva na produtividade de grãos. Enquanto Coimbra *et al.* (2004) verificaram que a população de plantas por unidade de área e número de grãos por planta têm o maior efeito direto sobre a variável rendimento de grãos, e que número de grãos por síliqua têm o maior efeito secundário.

Por sua vez, o restante dos caracteres (NGS, CT, DEF e EST) apresentou estimativas de efeito direto negativo sobre a produtividade de grãos. Destacando CT, que além da maior estimativa (-0,6157) e alta correlação fenotípica negativa com a PROD, ainda apresenta um valor acima daquele observado no efeito residual, demonstrando que tal caráter pode ser usado na seleção indireta. Segundo Vencovsky e BARRIGA (1992), quando a correlação entre um caráter causal e o principal for igual ou semelhante ao seu efeito direto, em sinal e magnitude, a seleção indireta do caráter causal será eficiente, visto que esta correlação expressa a verdadeira associação entre tais caracteres

Vale ressaltar, que a variável DEF apesar de ter baixo efeito direto negativo, possui uma correlação negativa que é significativa com a produtividade, sugerindo que a redução do período de florescimento pode contribuir no aumento da produtividade em canola. Contudo, a floração é a fase mais crítica que influencia no rendimento de grãos (DIEPENBROCK, 2000), assim, tal caráter inspira cuidado.

É importante frisar, que no presente estudo, nas condições de plantio em diferentes épocas de semeadura, foram observadas temperaturas iniciais mais elevadas, que podem ter levado a um encurtamento do ciclo e da duração do florescimento sem perdas muito significativas na produtividade. A data de semeadura tem decisivo efeito na duração da fase vegetativa e no florescimento (ROSA *et al.*, 2020a), sofrendo forte influência da temperatura do ar (LUZ *et al.*, 2012). Edwards e Hertel (2011) confirmaram essas informações, ao observarem que temperaturas na faixa dos 20 °C a canola emite uma nova folha a cada seis a dez dias. Por outro lado, em temperaturas superiores a 27 °C, tem-se uma redução no tempo para quatro dias.

Portanto, nas condições de plantio mais cedo na região de clima tropical de altitude, pensando em evitar déficit hídrico e a coincidência da floração com baixas temperaturas, a estratégia de selecionar híbridos de canola com menor ciclo pode ser usada em busca de maiores produtividades e ainda como forma de adequação à janelas produtivas. Porém, são necessários mais estudos verificando até que ponto tal redução no ciclo total é viável, para que não ocorra perdas em produtividade e no teor de óleo dos grãos.

Ao analisar os efeitos indiretos negativos via às variáveis, observou-se tal comportamento em NG via NGS e via EST; NGS via ALT e via EST; ALT via EST; CT via NG, via ALT e via DEF; DEF via NG, via ALT e via CT; EST via NGS. Reduzindo então, o efeito direto desses caracteres, assim como também o efeito total das outras características sobre a produtividade. Com isso, se ocorrer um aumento dessas características, pode resultar na redução de outras características, mesmo que elas expressem efeito direto sobre a produtividade de grãos.

Entretanto, vale ressaltar, que o alto efeito da variável residual (0,5501) mostra que o conjunto das seis variáveis não explica totalmente a variação na produtividade, uma vez que seu valor supera a maioria das estimativas dos efeitos diretos e indiretos. Dessa forma, a variação observada na produtividade também se deve a outros caracteres não mensurados no presente trabalho (CRUZ; CARNEIRO, 2006), como por exemplo, comprimento de síliqua, massa de síliqua e número de ramos. E também se deve a efeitos associados ao erro experimental, advindo de variações que ocorrem ao acaso.

4.3 Espectroscopia no Infravermelho Próximo (NIR)

Na Tabela 6 são apresentados os valores do teor de óleo nos grãos dos híbridos de canola, determinado pelo método químico tradicional em laboratório, adotando-se na extração a metodologia descrita em IUPAC (1979). Tais valores foram usados como referência para construção do modelo de calibração NIR.

Tabela 6 – Teor de óleo nos grãos dos diferentes híbridos de canola, determinado pelo método químico tradicional em laboratório. Lavras - MG, 2021.

Híbrido	Teor de óleo (%)				Embrapa (safra 2018)
	Épocas de semeadura (safra 2019)				
	15/02	28/02	20/03	09/04	
Nuola	29,79	30,83	29,07	27,74	-
Hyola 433	30,29	31,75	28,97	24,16	36,09
Hyola 571	28,94	30,88	29,21	27,56	31,39
Hyola 575	29,22	31,95	28,07	25,34	34,60
ALHT B4	30,32	35,72	28,32	24,92	35,28
Diamond	22,98	24,62	27,93	24,75	35,48
Hyola 50	-	-	-	-	26,75
Hyola 61	-	-	-	-	29,84
Hyola 76	-	-	-	-	35,27
Média	28,59	30,96	28,60	25,75	33,08

Fonte: Do autor (2021).

Observa-se que os valores do teor de óleo nos grãos variaram entre os híbridos e entre as épocas de semeadura (TABELA 6). Esse comportamento já era esperado, visto que a concentração de óleo da semente da canola é influenciada pelo genótipo (TOMM *et al.*, 2009b) e por fatores ambientais (LONG *et al.*, 2012), como temperatura e precipitação (TOMM *et al.*, 2009a).

Segundo Tomm *et al.* (2009a), os grãos de canola produzidos no Brasil apresentam em média 38% de óleo. No dado estudo, todas as épocas de semeadura resultaram em grãos com teores de óleo abaixo dessa média, principalmente a última época, em que nos grãos contêm, em média, 25,75% de óleo, uma diferença de doze percentual. Tal resultado ocorre graças a influência do ambiente no acúmulo de óleo, como relatado por Guo *et al.* (2017), ao estudarem os efeitos genéticos e da interação genótipos x ambientes no teor de óleo de semente de canola.

Variações no teor de óleo na cultura da canola em decorrência das épocas de semeadura também foram relatadas por outros autores. Rigon *et al.* (2017), por exemplo, avaliando seis híbridos de canola na região norte do estado do Rio Grande do Sul, em duas épocas de semeadura, confirmaram que o atraso da semeadura, independente do híbrido usado, acarreta perdas significativas no rendimento de grãos e no teor de óleo, assim como é observado no presente estudo. Arrúa *et al.* (2014), também observaram redução do teor de óleo com o atraso da semeadura, ao avaliarem o desempenho agrônomico e o potencial fisiológico das sementes de dois híbridos de canola (Hyola 433 e Hyola 61), em função de diferentes épocas de semeadura na região de Marechal Cândido Rondon, oeste do Paraná.

Ressalta-se que a cultura da canola é muito exigente com relação à disponibilidade de recursos do ambiente (ARRÚA *et al.*, 2014), demandando uma disponibilidade hídrica entre 312 mm a 500 mm, e temperaturas médias de 20 °C durante o seu ciclo (TOMM *et al.*, 2009a). E de acordo com Tomm *et al.* (2009b) o aumento de cada grau Celsius da temperatura na fase enchimento de grãos ocasiona uma redução de 1,5% a 2% de óleo no grão.

Assim, a ausência de precipitações durante o florescimento da canola pode ocasionar em perdas no rendimento e uma redução percentual de óleo dos grãos, principalmente se associado à altas temperaturas (TOMM *et al.*, 2009a). Justificando os baixos teores de óleo nos grãos do presente estudo, visto que nas épocas iniciais a pequena disponibilidade hídrica estava associada a temperaturas mais altas (FIGURA 3), e na última época de semeadura, apesar da redução nas temperaturas, o regime de chuvas foi quase nulo, mostrando que a falta de precipitação pode ter sido determinante na redução do teor de óleo dos grãos.

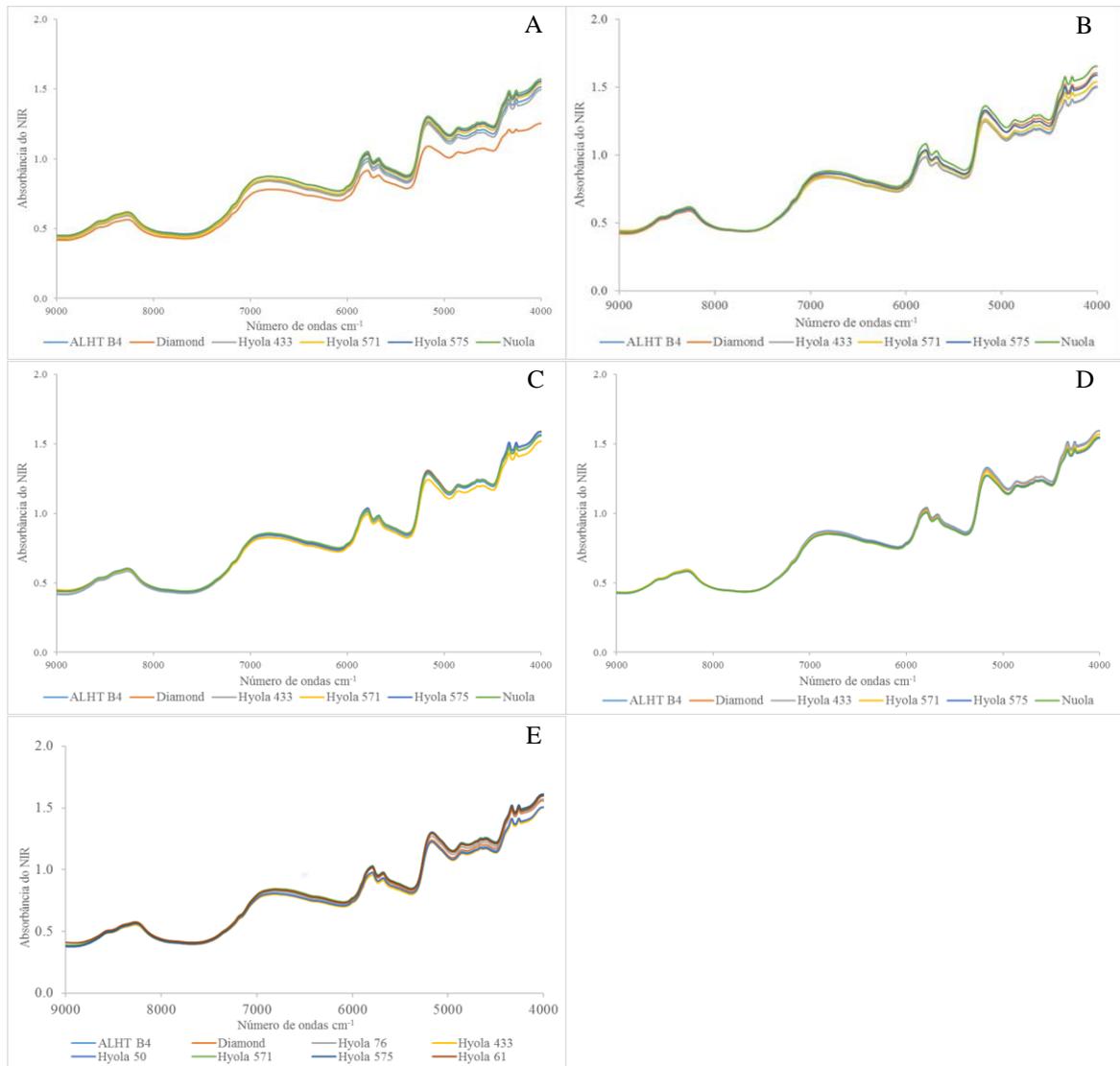
Em relação ao processo de extração para quantificar e produzir óleo a partir de grãos de canola, atualmente a metodologia mais comumente usada envolve a prensagem mecânica e

extração usando solventes (GABER *et al.*, 2018). Apesar desse processo convencional fornecer uma medição precisa do teor de óleo na semente, ele é demorado e usa grandes quantidades de produtos químicos (CHENG *et al.*, 2017), dentre eles, solventes altamente inflamáveis como o hexano, apresentando riscos ambientais (GABER *et al.*, 2018).

Com isso, torna-se necessário a busca por métodos alternativos ao processo convencional. A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), caracterizada por ser um método não destrutivo, que pode apresentar alta precisão, sem o uso de reagentes e sem produzir resíduos (BÜNING-PFAUE, 2003), surge como uma alternativa viável. Essa técnica já foi relatada anteriormente para prever o teor de óleo em canola (BARTHET; PETRYK; SIEMENS, 2020; ROSSATO *et al.*, 2013), soja (JIANG, 2020), gergelim (XU; ZHOU; CHEN, 2017), girassol (KAUVA *et al.*, 2019), e até composição do óleo de colza (SIEMENS; DAUN, 2005), dentre outros. Dada a velocidade da análise e a não destruição dos grãos, torna-se útil ao melhoramento genético, controle de qualidade em fábricas de óleo e de rações (PETISCO *et al.*, 2010).

Desse modo, foi realizado o ajuste de modelos multivariados NIR. Os espectros médios coletados via esfera de integração, dos grãos dos híbridos de cada ambiente de produção apresentados na Tabela 6, podem ser observados na Figura 6 (faixa de 9.000 a 4.000 cm^{-1}). Uma vez que na faixa de 12.500 a 9.000 cm^{-1} observou-se a presença de muito ruído, sendo difícil a obtenção de informação úteis para as análises, com isso, essa faixa foi eliminada, e na construção do modelo utilizou-se a faixa de 9.000 a 4.000 cm^{-1} .

Figura 6 - Espectros médios dos grãos de canola da primeira época de semeadura (A), segunda época de semeadura (B), terceira época de semeadura (C), quarta época de semeadura (D) e grãos da Embrapa Agroenergia (E), na faixa de 9.000 a 4.000 cm^{-1} .



Fonte: Do autor (2021).

De forma geral, os espectros obtidos dos grãos de canola apresentaram um padrão espectral semelhante em relação às bandas de absorção (FIGURA 6), chegando a ocorrer sobreposição desses espectros, o que era esperado, pois apesar de se tratar de híbridos diferentes, os mesmos são da mesma espécie e apresentam teor de óleo similares. Essa observação visual e interpretação de espectros é o método mais simples para identificar outliers, decorrentes de erros na medição (como sujeira), tais outliers devem ser removidos já que podem influenciar os modelos (SANDAK; SANDAK; MEDER, 2016).

Com isso, analisando os espectros nos diferentes ambientes, ainda é possível observar pequenas variações entre os híbridos no mesmo ambiente e em função de cada ambiente

(FIGURA 6), que possivelmente está associado a existência de diferenças na constituição química das amostras, como a variação no teor de óleo dos grãos de cada genótipo e ao se cultivar em diferentes ambientes (TABELA 6). Segundo Pasquini (2003), a assinatura espectral é resultante da interação da luz com as moléculas constituintes do material, desse modo, cada material exibe uma resposta específica à incidência da radiação.

Na primeira época de semeadura, o híbrido Diamond apresenta menor conteúdo de óleo (TABELA 6), o que possivelmente resultou no menor valor de absorvância, quando comparado aos demais materiais que apresentam teor de óleo mais próximos, e conseqüentemente, um perfil espectral semelhante (FIGURA 6A). Já na segunda época de semeadura ocorre uma pequena variação no perfil espectral (FIGURA 6B), os espectros se diferem mais de 6000 a 4000 cm^{-1} , e o híbrido Nuola sempre apresenta os maiores picos de absorvância. Ao passo que, nas demais épocas de semeadura, os teores de óleo não apresentam muita variação entre os híbridos, assim, o perfil espectral é basicamente o mesmo em cada ambiente, ocorrendo sobreposição dos espectros (FIGURA 6C e D). Enquanto que nos grãos provenientes da Embrapa, observa-se que os espectros dos híbridos Hyola 50 e Hyola 433 estão quase sempre sobrepostos, com os menores picos de absorvância, e os demais genótipos apresentam um perfil espectral semelhante, com maiores picos de absorvância em Hyola 575 (FIGURA 6E).

Os maiores valores de absorvâncias são observados entre a faixa de 7000 a 4000 cm^{-1} , tal comportamento também foi observado em girassol por Vasconcelos *et al.* (2018), estudando os espectros obtidos do óleo de girassol extraído de sementes com e sem pericarpo. Uma vez que as absorções das bandas entre 4200 e 5400 cm^{-1} , são atribuídas às bandas de combinação entre os grupos funcionais $-\text{C}=\text{O}$, $-\text{NH}$, $-\text{CH}$ e $\text{C}-\text{C}$, de carboidratos, proteínas, lipídios, ácidos nucléicos e pigmentos de clorofila presentes nas células (MECOZZI; PIETROLETTI; TORNAMBÈ, 2011). Sendo que a região da banda 4329 cm^{-1} geralmente está correlacionada com o conteúdo de óleo (WORKMAN JR.; WEYER, 2012), justificando os maiores picos de absorvância na região 4000 cm^{-1} observados no presente estudo.

Para uma prévia avaliação do comportamento dos espectros originais e possível separação das amostras de acordo com os ambientes em que os híbridos foram semeados, foi realizada a análise de componentes principais – PCA (FIGURA 7). Na Figura 7 observa-se os scores da PCA dos 96 espectros dos grãos de canola. A componente principal 1 explica 99,97% da variabilidade dos dados analisados e a componente principal 2 explica 0,02%, e juntas conseguiram explicar 99,99% da variância total.

A partir da Figura 7 observa-se que a PCA possibilita separar parcialmente os híbridos de canola de acordo com o ambiente, pois nota-se similaridade espectral entre os materiais. Isso

se deve ao fato da utilização de alguns mesmos genótipos nos diferentes ambientes, e além disso, como os materiais são da mesma espécie, são geneticamente parecidos. Porém, as amostras da Embrapa Agroenergia mostram um agrupamento mais nítido, assim como os materiais da primeira época de semeadura. Nesse último é possível observar 3 amostras discrepantes, possivelmente do híbrido Diamond, que apresenta o menor e mais discrepante teor de óleo entre os materiais. Assim, a Espectroscopia do Infravermelho Próximo (NIR) não foi sensível às diferenças de características.

Com base nas assinaturas espectrais das amostras de grãos de canola foram realizadas calibrações e validações (cruzada e externa), utilizando-se o método de calibração multivariado Regressão de Mínimos Quadrados Parciais (PLSR). Esse método permite a previsão de parâmetros desejados em amostras (FERREIRA, 2015), podendo ser usado para prever o teor de óleo nos grãos de canola. A partir do estabelecimento de uma relação matemática linear entre dois conjuntos de dados: X (espectros) e Y (teor de óleo), usando combinações lineares ortogonais das variáveis originais, denominadas variáveis latentes (LV), que capturam a covariância máxima entre as variáveis X e Y (FERREIRA, 2015).

A Tabela 7 apresenta as estatísticas dos modelos feitos por PLS-R e validação cruzada.

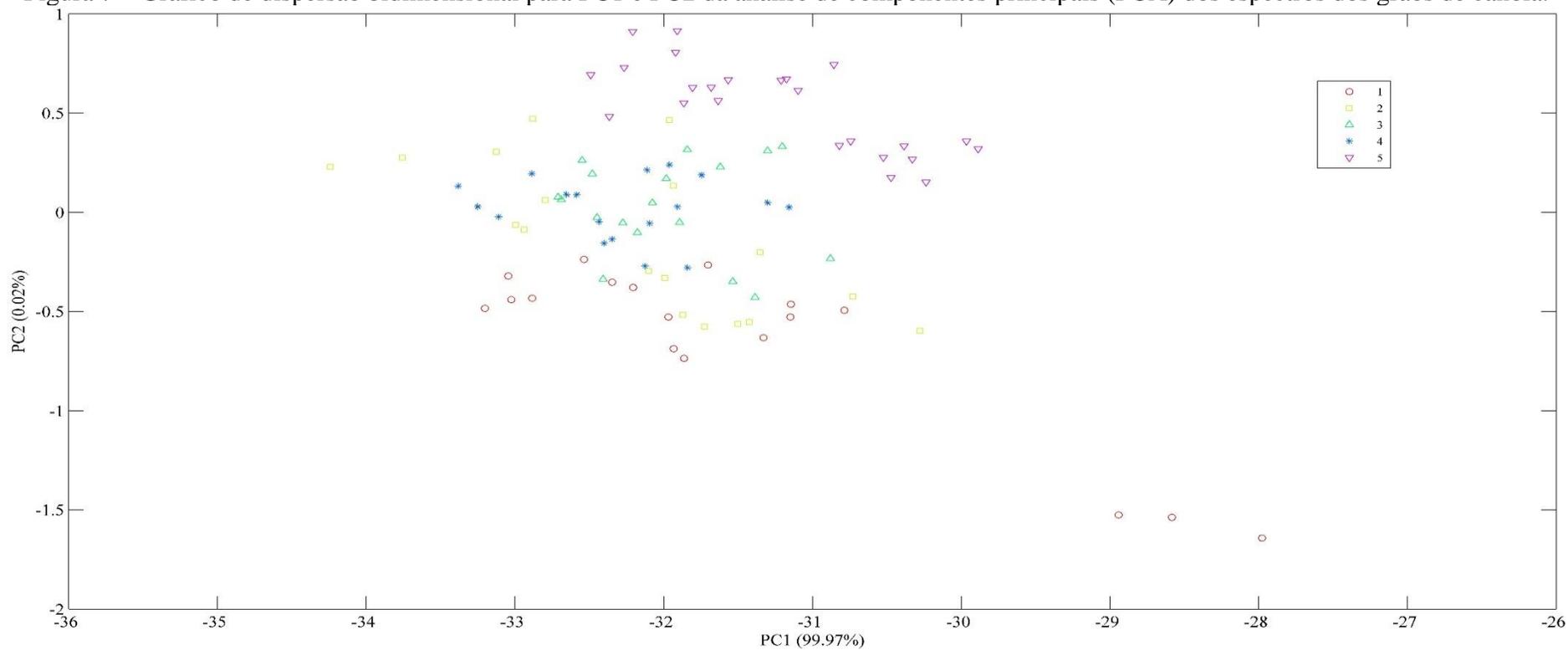
Tabela 7 - Calibração e validação cruzada para o teor de óleo em canola por PLS – R, com base no espectro NIR.

Modelos	Base de dados	Tratamento	R ² c	RMSEC	R ² cv	RMSECV	LV
1	96	deo	0,64	2,127	0,45	2,655	5
2	93	deo	0,84	1,426	0,80	1,635	7
3	96	1d	0,79	1,618	0,53	2,449	7
4	93	1d	0,85	1,385	0,70	1,993	7

R²c - coeficiente de determinação para calibração; RMSEC - erro médio quadrático para a calibração; R²cv - coeficiente de determinação para a validação cruzada; RMSECV - erro médio quadrático para a validação cruzada; LV - variáveis latentes; deo - dados espectrais originais; 1d - primeira derivada.

Fonte: Do autor (2021).

Figura 7 – Gráfico de dispersão bidimensional para PC1 e PC2 da análise de componentes principais (PCA) dos espectros dos grãos de canola.



¹Primeira época de semeadura, ²Segunda época de semeadura, ³Terceira época de semeadura, ⁴Quarta época de semeadura, ⁵Embrapa Agroenergia.

Fonte: Do autor (2021).

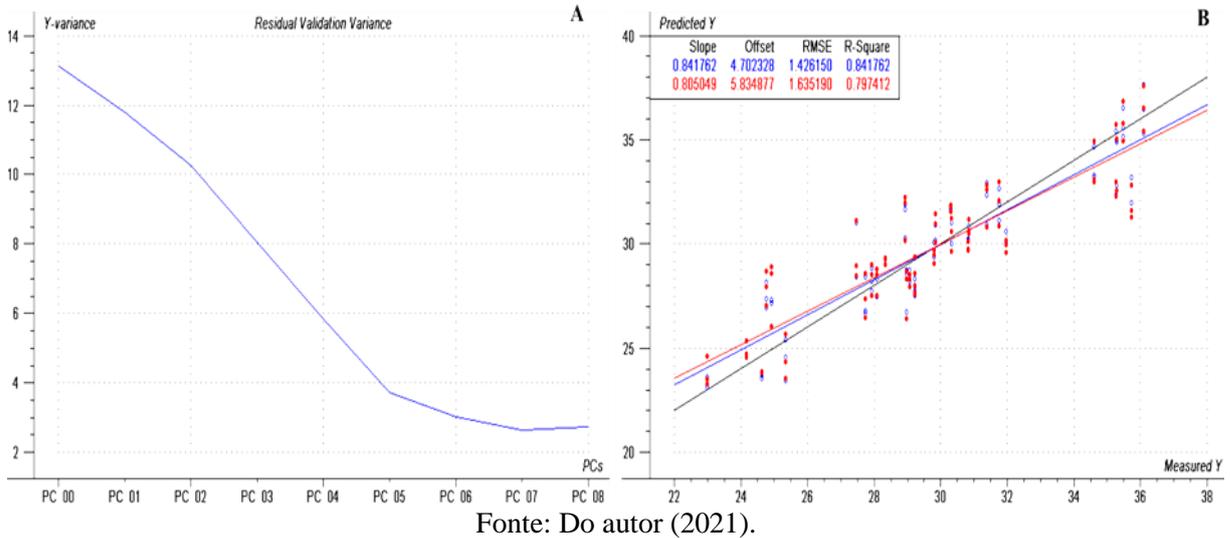
As calibrações no NIR podem ser avaliadas com base no coeficiente de determinação (R^2), que indica o quanto de variabilidade existente nos dados é explicado pelo modelo, e também a partir do RMSEC e RMSECV, que além de exibirem informações sobre a dispersão do conjunto de dados mostram qual a precisão de estimativa do modelo (NETO *et al.*, 2017). Com isso, o objetivo geral do desenvolvimento de modelos de previsão é gerar calibrações com altos valores de R^2 e baixos valores de RMSE (SANDAK; SANDAK; MEDER, 2016). Visto que, quanto maior o R^2_{cv} e menor forem os valores de RMSEC e RMSECV, melhor o desempenho preditivo do modelo (ZHU *et al.*, 2018). Ferreira *et al.* (2014) afirmam que valores mais próximos de um para R^2 e valores baixos para RMSE indicam o bom desempenho do modelo para a previsão dos parâmetros de qualidade da soja.

No presente estudo, observa-se na Tabela 7, que a utilização dos 96 dados espectrais originais, com 5 variáveis latentes (escolhido pelo programa em função da menor variância residual), resultou em um modelo não tão eficiente, obtendo um R^2_c de 0,64 e R^2_{cv} de 0,45, com altos valores de RMSE. Valores baixos para o coeficiente de determinação também foram relatados por Kaur, Sangha e Kaur, (2017), que obtiveram R^2_c de 0,4147 e R^2_{cv} de 0,3932, RMSEC de 1,7105 e o RMSECV de 1,7394, no desenvolvimento de equações para estimar o teor de óleo nas sementes de *Brassica napus*, porém, observaram melhores resultados ao trabalharem com *Brassica juncea*, que apresentou R^2_c de 0,8335 e R^2_{cv} de 0,7410, o RMSEC de 0,9226, e o RMSECV de 1,1560.

De acordo com Ferreira *et al.* (1999), ao verificarem a qualidade do conjunto de calibração, é necessário garantir que as amostras formem um conjunto homogêneo e remover aquelas consideradas outliers. A melhor maneira de se determinar as amostras anômalas é através da análise do gráfico dos resíduos de *student x leverage*, em que amostras com altos resíduos, mas com pequena *leverage*, possivelmente apresentam algum erro no valor da concentração, devendo-se proceder a exclusão de tal amostra e reconstruir o modelo.

Desse modo, a partir do gráfico resíduos de *student x leverage* (FIGURA 8) foram identificadas e removidas três amostras anômalas (outliers), que poderiam estar reduzindo a qualidade do modelo.

Figura 9 - Gráfico resíduos de *student* x *leverage* dos espectros dos grãos de canola (A), sem três outliers, gráfico de regressão da validação cruzada com valores obtidos em laboratório e previsto pelo NIR para teor de óleo (B), em porcentagem (modelo 2 da tabela 7).



Sen *et al.* (2018), utilizando a regressão MPLS (*Modified partial least squares*) para desenvolverem novos modelos de calibração NIR, para preverem o teor de óleo e outros constituintes em duas espécies oleaginosas de Brassica, encontraram um maior valor de R^2c (0,992), porém, um menor valor de R^2cv (0,743) para *Brassica napus*. Ao passo que melhores resultados foram encontrados por Wan *et al.* (2018) ao explorar a possibilidade de detectar o teor de óleo de colza usando a tecnologia NIR, observando valores de R^2c de 0,98 e R^2cv de 0,97, o RMSEC de 0,65, e o RMSECV de 0,64. Assim como Barthet, Petryk e Siemens (2020), ao desenvolverem calibrações para um espectrômetro portátil, determinando a composição da semente de canola em termos de óleo e outros compostos, encontraram R^2c de 0,988 e R^2cv de 0,961, o RMSEC de 0,27, e o RMSECV de 0,49.

Resultados diferentes também foram encontrados em outros trabalhos que utilizaram sementes únicas de colza, para desenvolver equações de calibração NIR, e assim prever o teor de óleo. Hom, Becker e Möllers (2007), obtiveram um R^2c de 0,98, R^2cv de 0,97, RMSEC de 0,98 e RMSECV de 1,14. E Velasco *et al.* (1999) encontraram R^2cv de 0,94 e RMSECV de 1,98. Tais valores superiores, podem ser justificados pelo maior número de amostras usadas no modelo, espectros de 795 amostras de sementes únicas em Hom, Becker e Möllers (2007) e espectros de 765 amostras em Velasco *et al.* (1999).

Durante a construção do modelo, é comum realizar anteriormente o pré-tatamento dos dados espectrais, como o uso da primeira derivada, para remover distorções e erros nos espectros NIR (PASQUINI, 2018). Assim, observa-se na Tabela 7, que ao tratar todos os dados

com primeira derivada (modelo 3), houve certa melhoria nas estatísticas, reduzindo o erro médio quadrático da calibração e da validação em relação aos dados sem tratamentos (deo), e aumentando os valores do R^2c e R^2cv , para 0,79 e 0,53, respectivamente. Ao passo que, aplicando-se a primeira derivada nos 93 dados (retirando outliers - modelo 4), as estatísticas não melhoraram, pois apesar da redução do RMSEC e aumento do R^2c , também houve uma redução do R^2cv para 0,70 e aumento do RMSECV para 1,993 (TABELA 7). E segundo Neto *et al.* (2017), quanto menor for o RMSE, mais preciso será o modelo e menos disperso será o conjunto de dados.

De acordo com Pasquini (2003) é recomendado o uso da validação externa, pois isso gera resultados mais realistas que são independentes de quaisquer dados empregados na construção do modelo. Para esse conjunto externo de amostras, o desempenho do modelo é geralmente avaliado pela raiz do erro quadrático médio de previsão (RMSEP) (PASQUINI, 2003), e quanto menor RMSEP, melhor acurácia do modelo.

Nessa validação externa torna-se necessário dividir os dados em dois subconjuntos representativos: um conjunto para construir o modelo e outro conjunto de teste (não participa da construção ou seleção do modelo), permitindo que o último conjunto seja completamente independente (externo) do primeiro, e assim estimar de forma confiável a capacidade preditiva do modelo para novas amostras, ao prever o valor das respostas nas amostras de teste, tornando possível calcular o erro em sua previsão (BIANCOLILLO, MARINI, 2018). Com isso, na Tabela 8 são apresentadas as estatísticas dos modelos feitos por regressão PLS-R e validação externa, em que a primeira coluna mostra o conjunto de dados usados para validar o modelo.

Tabela 8 - Calibração e validação externa para o teor de óleo em canola por PLS - R, com base no espectro NIR.

Modelo	Dados validação	Tratamento	R^2c	RMSEC	R^2p	RMSEP	LV
5	Embrapa	deo	0,81	1,270	0,36	4,479	7
6	24 aleatórios	deo	0,68	1,904	0,67	2,329	7
7	23 aleatórios	deo	0,83	1,406	0,86	1,561	7
8	24 aleatórios	1d	0,86	1,285	0,75	2,053	8

R^2c - coeficiente de determinação para calibração; RMSEC - erro médio quadrático para a calibração; R^2p - coeficiente de determinação para a validação externa; RMSEP - erro médio quadrático para a validação externa; LV - variáveis latentes; deo - dados espectrais originais; 1d - primeira derivada.

Fonte: Do autor (2021).

Observa-se na Tabela 8, que ao selecionar manualmente e utilizar os últimos 24 dados espectrais brutos (amostras 73 a 96, correspondente aos grãos da Embrapa - modelo 5) para validação externa, obteve-se uma boa calibração, com um R^2c de 0,81 e RMSEC de 1,270,

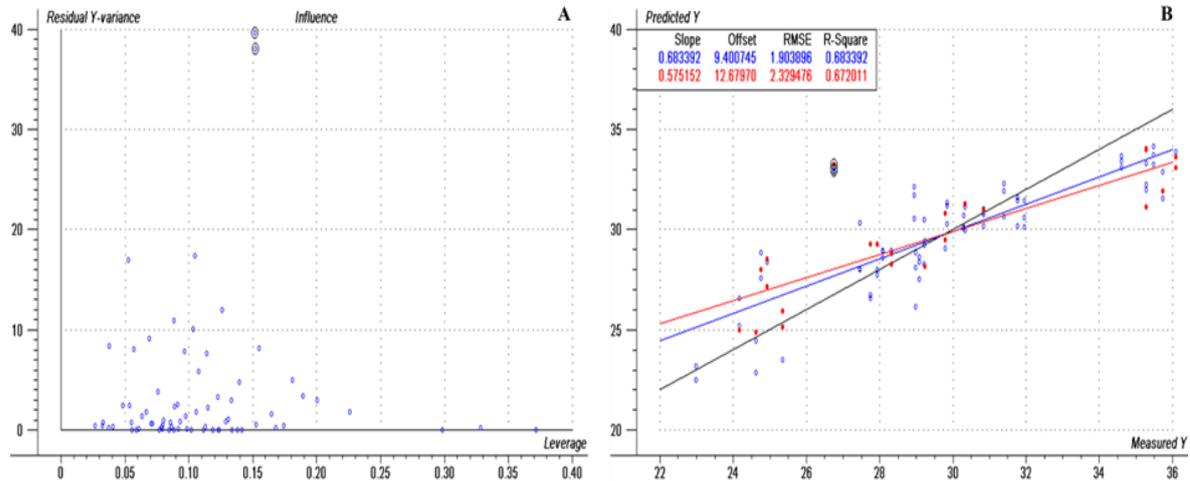
porém, com baixo R^2_p de 0,36 e alto RMSEP de 4,479, resultando em uma validação não adequada. Essa baixa precisão encontrada pode ser devido às condições das últimas amostras, provenientes da Embrapa, que possivelmente apresentava condições diferentes das amostras usadas na calibração (épocas de semeadura). Uma vez que é muito importante o condicionamento adequado das amostras antes da medição, para minimizar essa variação indesejada entre amostras (SANDAK; SANDAK; MEDER, 2016). No entanto, é difícil manter todas as condições e parâmetros de medição constantes, mas a robustez do modelo de calibração é influenciada por vários fatores externos, como temperatura, umidade e outras variáveis incertas (XU; XIE; YING, 2019).

Para melhorar o modelo, foram selecionados de forma randômica 24 dados espectrais brutos para validação externa (TABELA 8), resultando em uma redução na qualidade da calibração (R^2_c de 0,68 e RMSEC de 1,904) e uma melhoria na validação, com aumento do R^2_p para 0,67 e redução do RMSEP para 2,329, porém, o modelo 6 ainda não é satisfatório.

Diante disso, buscando ainda melhorar o modelo, foi aplicada a primeira derivada nos 24 dados espectrais brutos aleatórios para validação externa (TABELA 8). Houve um aumento no número de variáveis latentes para 8, diferente dos demais modelos que foram utilizadas 7. Mas observa-se que também ocorreu um aumento dos valores de R^2_c e R^2_{cv} , para 0,86 e 0,73, respectivamente. Enquanto que ocorreu uma redução no RMSEC para 1,285 e no RMSEP para 2,053. Apesar dos maiores valores de R^2 , os valores de RMSE não foram tão baixos, tornando o modelo 8 não muito eficiente na predição do teor de nos grãos de canola.

Na Figura 10, observando o gráfico resíduos de *student x leverage* (FIGURA 10A) e o gráfico de regressão (FIGURA 10B) com os 24 dados espectrais brutos aleatórios, é possível identificar dois outliers, que poderiam estar causando a redução da eficiência do modelo.

Figura 10 - Gráfico resíduos de *student x leverage* dos espectros dos grãos de canola (A) com dois outliers, gráfico de regressão da validação externa randômica com valores obtidos em laboratório e previsto pelo NIR para teor de óleo (B), em porcentagem (modelo 6 da tabela 8).



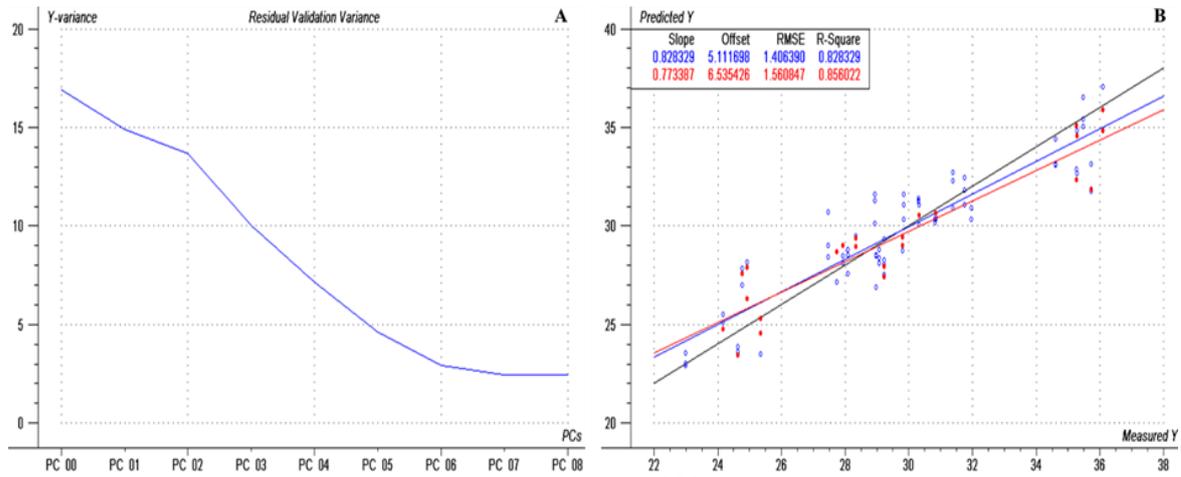
Fonte: Do autor (2021).

Ao retirar esses dois outliers, excluindo um dado da calibração e outro da validação (modelo 7), a validação externa foi feita com 23 dados espectrais brutos aleatórios, resultando no melhor modelo, aumentando o R^2_c para 0,83 e R^2_p para 0,86, e reduzindo RMSEC para 1,406 e RMSEP para 1,561 (TABELA 8). Na Figura 11A observa-se que foram usadas 7 variáveis latentes no ajuste do modelo. E ainda na Figura 11B os resultados são apresentados através do gráfico com os valores obtidos em laboratório e previsto pelo NIR, mostrando intensa associação entre os valores mensurados e preditos pelo modelo.

Esses valores são próximos dos encontrados por Sidhu, Haagenon e Wiesenborn, (2012), que ao avaliarem modelos de calibração NIR para prever o teor de óleo a partir de 3g de sementes de canola, obtiveram um R^2_c de 0,82 e R^2_p de 0,84, o RMSEC de 1,39, e o RMSEP de 0,61.

Ao passo que Rossato *et al.* (2013) encontraram resultados diferentes do presente estudo, R^2 da equação de 0,92, o RMSEC de 0,78, e o RMSEP de 1,22, buscando estabelecer uma equação de calibração e estimar a eficiência de espectroscopia NIR para avaliar o teor de óleo de canola no sul do Brasil. Valores superiores também foram obtidos por Petisco *et al.* (2010), que encontraram R^2_c de 0,98 e R^2_p de 0,98, o RMSEC de 0,51, e o RMSEP de 0,54, tal fato pode ter ocorrido graças a inclusão de uma maior variabilidade no estudo, que utilizou sementes intactas de quatro variedades de Brassica (*B. napus* ES Hydromel, *B. napus* ES Nectar, *B. napus* ES Betty e *B. carinata* Line C-101) coletadas em dois anos de safra diferentes.

Figura 11 - Gráfico resíduos de *student x leverage* dos espectros dos grãos de canola (A) sem dois outliers, gráfico de regressão da validação externa randômica com valores obtidos em laboratório e previsto pelo NIR para teor de óleo (B), em porcentagem (modelo 7 da tabela 8).



Fonte: Do autor (2021).

Apesar dos melhores modelos do presente estudo, apresentarem valores de R^2 menores quando comparados com os da maioria encontrados na literatura, os mesmos são considerados satisfatórios e mostram boa previsão. Visto que, valores de R^2 entre 0,66 e 0,81 indicam aproximadas previsões quantitativas, valores entre 0,82 e 0,90 revelam boa previsão, e os valores acima de 0,91 indicam ótima calibração para os modelos (WILLIAMS; ANTONISZYN; MANLEY, 2019).

Portanto, o melhor modelo se dá na validação independente se usando 23 dados espectrais brutos aleatórios, apresentando um R^2 de 0,83 durante a calibração, e um R^2 de 0,86 durante a validação. E ainda, o RMSE é menor do que aqueles obtidos durante a calibração com validação cruzada, correspondendo a 1,56% da faixa de amostra, indicando baixo espalhamento, e previsões precisas também para o conjunto de dados. Assim, o modelo 7 é satisfatório, já que através dele é possível prever o teor de óleo em milhares de amostras com um erro de apenas 1,56%.

Deste modo, o modelo 7 pode ser usado com sucesso na predição do teor de óleo nos grãos de canola, na análise da qualidade das amostras após colheita, e assim, realizar seleção de híbridos de forma mais rápida. Posteriormente, o mesmo pode ser atualizado, adicionando amostras de diferentes ambientes, aumentando ainda mais a faixa de variação do conteúdo de óleo presente nos genótipos, garantindo maior aplicação e robustez ao modelo multivariado.

Mas vale ressaltar, que tal modelo apresenta certa limitação em relação à aplicação, que se torna mais regional, graças aos menores teores de óleo dos híbridos quando cultivados nas nossas condições. Tornando necessário desenvolver modelos com maior variação no teor de

óleo nos grãos, ampliando o número de amostras para englobar toda possível variação existente nos genótipos de canola. Sendo assim, o desenvolvimento de equações NIR é o primeiro passo para a substituição do processo químico tradicional usado para quantificar óleo, por métodos não destrutivos, e posteriormente, seu uso em programas de melhoramento (SEN *et al.*, 2018).

5 CONCLUSÕES

Os caracteres número de grãos em cinco plantas (0,6857) e altura (0,4943) apresentaram maiores estimativas de correlação positiva com a produtividade de grãos, assim como os maiores valores de efeito direto positivo sobre a produtividade, 0,2494 e 0,1595 respectivamente. O ciclo total (-0,7848), juntamente com dias em florescimento (-0,4520) apresentaram correlação significativa negativa com a variável produtividade, com destaque para o ciclo que se figura com um alto efeito direto negativo sobre a produtividade (-0,6157). Portanto, tais caracteres na cultura da canola, merecem maior atenção ao praticar seleção em programas de melhoramento no intuito de aumentar a produtividade de grãos, especialmente o ciclo da cultura.

O presente estudo ainda permitiu o desenvolvimento de bons modelos preditivos para o teor de óleo nos grãos de canola, a partir da espectroscopia na região do infravermelho próximo, no qual o melhor modelo apresentou um R^2 de 0,86 e RMSE de 1,56 na validação externa. Contudo, apesar destes resultados serem satisfatórios e promissores, os modelos apresentam certa limitação em relação à aplicação, que se torna mais regional, graças aos menores teores de óleo dos híbridos quando cultivados nas nossas condições. Assim, são necessários mais estudos nessa área. É preciso desenvolver modelos com maior variação no teor de óleo nos grãos, ampliando o número de amostras para englobar toda possível variação existente nos genótipos de canola.

REFERÊNCIAS

- ABBADI, A.; G. LECKBAND. Rapeseed breeding for oil content, quality, and sustainability. **European Journal of Lipid Science and Technology**, [s.l.], v. 113, n. 10, p. 1198-1206, 2011.
- ALLARD, R. W.; BRADSHAW A. D. Implications of genotype-environmental interactions in applied plant breeding. **Crop science**, [s.l.], v. 4, n. 5, p. 503-508, 1964.
- ANP. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Óleo diesel brasileiro passa a conter mínimo de 12% de biodiesel**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/noticias/5633-oleo-diesel-brasileiro-passa-conter-minimo12biodiesel/>. Acesso em: 02 jun. 2020.
- _____. **Despacho ANP N° 621, de 06 de agosto de 2019**. B11 obrigatório. Disponível em: <https://ubrabiio.com.br/2019/08/07/despacho-anp-no-621-b11-obrigatorio/>. Acesso em: 20 abr. 2021.
- ARAUJO, L. N. *et al.* Avaliação de genótipos de canola na região do Cerrado. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA E INOVAÇÃO DE BIODIESEL, 7., 2019, Florianópolis. **Anais** [...]. Florianópolis, Embrapa Agroenergia, Rede Brasileira de Tecnologia e Inovação de Biodiesel, 2019.
- ARRÚA, M. A. M. *et al.* Características agronômicas e teor de óleo da canola em função da época de semeadura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 9, p. 934-938, 2014.
- ASSIS, R. M. *et al.* Canola agronomic performance in three sowing dates in Jataí-GO. **Bioscience Journal**, [s.l.], v. 36, p. 36-47, 2020.
- AUKEMA, H.; CAMPBELL, L. Oil nutrition and utilization. In: **Canola**. [s.l.]: Elsevier, 2011. p. 245-280.
- BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. do N. **Experimentação agrícola**. 4 ed. Jaboticabal: Funep, 2006. 237 p.
- BARASKAR, V. *et al.* Correlation and path analysis for seed yield in soybean [*Glycine max* (L.) Merrill]. **Electronic Journal of Plant Breeding**, [s.l.], v. 6, n. 2, p. 570-573, 2015.
- BARTHET, V. J *et al.* Canola: Overview. In: **Reference Module in Food Science**. [s.l.]: Elsevier, 2016. p. 237-241.
- BARTHET, V. J.; DAUN, J. K. Seed morphology, composition, and quality. In: **Canola Chemistry, Production, Processing, and Utilization**. Elsevier, p. 119-162, 2011.
- BARTHET, V. J.; PETRYK, M. W. P; SIEMENS, B. Rapid Nondestructive Analysis of Intact Canola Seeds Using a Handheld Near-Infrared Spectrometer. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, [s.l.], v. 97, n. 6, p. 577-589, 2020.
- BERGMANN, J. C. *et al.* Biodiesel production in Brazil and alternative biomass feedstocks. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 21, n. 1, p. 411-420, 2013.

BIANCOLILLO, A.; MARINI, F. Chemometrics applied to plant spectral analysis. *In: Comprehensive Analytical Chemistry*. [s.l.]: Elsevier, 2018. V. 80. p. 69-104.

BOTTEGA, E. L. *et al.* Desempenho produtivo de genótipos de canola na região central do Rio Grande do Sul. **Revista Cultura Agrônômica**, [s.l.], v. 29, n. 1, p. 01-10, 2020.

BP ENERGY. **Statistical Review of World Energy 2020 | 69th edition**. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2021.

BÜNING-PFAUE, H. Analysis of water in food by near infrared spectroscopy. **Food Chemistry**, [s.l.], v. 82, n. 1, p. 107-115, 2003.

CANOLA COUNCIL OF CANADA. **Canola Grower's Manual**. Disponível em: <http://www.canolacouncil.org/publication-resources/print-resources/crop-production-resources/archived-crop-production-publications/canola-growers-manual/>. Acesso em: 19 jan. 2020.

CARLSSON, A. S. *et al.* **Oil Crop Platforms for Industrial uses**: Outputs from the EPOBIO project. [s.l.], CPL Press, 2007. 158 p.

CARVALHO, C. G. P. *et al.* Correlações e análise de trilha em linhagens de soja semeadas em diferentes épocas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 37, n. 3, p. 311-320, 2002.

CASTRO, D. G. *et al.* Estimativas de associação entre caracteres agrônômicos na seleção de genótipos de arroz de terras altas. **MAGISTRA**, [s.l.], v. 30, p. 359-367, 2019.

CNPE. Conselho Nacional de Política Energética. **Resolução Nº 16, de 29 de outubro de 2018**. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=369098>. Acesso em: 20 dez. 2021.

CHENG, J. *et al.* NIR hyperspectral imaging with multivariate analysis for measurement of oil and protein contents in peanut varieties. **Analytical Methods**, [s.l.], v. 9, n. 43, p. 6148-6154, 2017.

COIMBRA J. L. M. *et al.* Análise de trilha dos componentes do rendimento de grãos em genótipos de canola. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 34, n. 5, p. 1421-1428, 2004.

COIMBRA J. L. M. *et al.* Consequências da multicolinearidade sobre a análise de trilha em canola. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 35, n. 2, p. 347-352, 2005.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Séries históricas da safra brasileira de grãos**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=20>. Acesso em: 20 dez. 2019.

_____. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento safra brasileira de grãos Safra 2020/21**, v. 8, n. 4. p. 1-85. Quarto levantamento, Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>. Acesso em: 11 fev. 2021.

CRUZ, C. D. **Programa GENES: estatística experimental e matrizes**. Viçosa: UFV, 2006. 285 p.

CRUZ, C. D.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2 ed. Viçosa: UFV, 2006. V. 2. 585 p.

CRUZ, C. D. GENES: a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. **Acta Scientiarum, Maringá, [s.l.]**, v. 35, n. 3, p. 271-276, 2013.

CRUZ, C.; REGAZZI A. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 2 ed. Viçosa: UFV, 1997. 390 p.

DA COSTA, A. C. T. *et al.* Comportamento de dois híbridos de canola cultivados em diferentes épocas na região oeste do Paraná. **Brazilian Journal of Development, [s.l.]**, v. 6, n. 9, p. 72498-72510, 2020.

DAHMER, N. *et al.* Efeito de épocas de semeadura sobre o desempenho de híbridos de canola, safra 2010. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CANOLA, 2017, Passo Fundo. **Anais [...]**. Passo Fundo: Embrapa Trigo- (ALICE), 2017.

DALMAGO, G. *et al.* **Zoneamento agroclimático para a canola no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)).

DE MORI, C. *et al.* **Levantamento de tecnologias empregadas no cultivo de canola pelos produtores do Rio Grande do Sul, Paraná e Minas Gerais**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2019

DIEPENBROCK, W. Análise de rendimento de colza oleaginosa de inverno (*Brassica napus* L.): uma revisão. **Pesquisa de colheitas de campo, [s.l.]**, v. 67, n. 1, p. 35-49, 2000.

DURIGON, M. *et al.* Indicações de uso e boas práticas de manejo da tecnologia Clearfield em canola para as regiões Sul e Centro-Oeste. **Revista Plantio Direto, [s.l.]**, v. 25, n.1, p. 22-30, 2016.

EDWARDS, J.; HERTEL, K. **Crescimento e desenvolvimento da canola**. New South Wales: Department of Primary Industries, 96p., 2011.

ESCOBAR, M. *et al.* Genotype x environment interaction in canola (*Brassica napus* L.) seed yield in Chile. **Chilean Journal of Agricultural Research, [s.l.]**, v. 71, n. 2, p. 175-186, 2011.

ESTEVEZ, R. L. *et al.* A Cultura da Canola (*Brassica napus* var. *oleifera*). **Scientia Agraria Paranaensis, [s.l.]**, v. 13, n. 1, p. 1-9, 2014.

FALCONER, D. S.; MACKAY, T. F. C. **Introduction to quantitative genetics**. 4. ed. London: Longman, 1996. 463 p.

FERREIRA, D. S. *et al.* Comparison and application of near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopy for determination of quality parameters in soybean samples. **Food Control, [s.l.]**, v. 35, n. 1, p. 227-232, 2014.

FERREIRA, M. M. C. *et al.* Quimiometria I: calibração multivariada, um tutorial. **Química Nova**, [s.l.], v. 22, n. 5, p. 724-731, 1999.

FERREIRA, M. M. C. **Quimiometria: Conceitos, Métodos e Aplicações**. Campinas: Unicamp, 2015. 493 p.

FIGUEIREDO, A. N. *et al.* Divergência genética em acessos de mamona (*Ricinus communis* L.) baseada nas características das sementes. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, [s.l.], v. 4, n. 2, 2004.

FAO. Food and Agriculture Organization. FAOSTAT. **Food and agriculture data 2018**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 29 fev. 2020.

_____. **Food and agriculture data 2021**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 11 fev. 2021.

FIGUEIREDO FILHO, D. B. F.; SILVA JUNIOR, J. A da. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, [s.l.], v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.

FODOR, M. *et al.* Development of a rapid, non-destructive method for egg content determination in dry pasta using FT-NIR technique. **Journal of Food Engineering**, [s.l.], v. 107, n. 2, p. 195-199, 2011.

FONT, R.; DEL RÍO-CELESTINO, M.; DE HARO-BAILÓN, A. The use of near-infrared spectroscopy (NIRS) in the study of seed quality components in plant breeding programs. **Industrial Crops and Products**, [s.l.], v. 24, n. 3, p. 307-313, 2006.

FRIEDT, W. *et al.* Academic and Economic Importance of Brassica napus Rapeseed. In: **The Brassica Napus Genome**. [s.l.]: Springer, 2018. p. 1-20.

GABER, M. A. F. M. *et al.* Improving oil extraction from canola seeds by conventional and advanced methods. **Food Engineering Reviews**, [s.l.], v. 10, n. 4, p. 198-210, 2018.

GANDOLFI, M. V. C. *et al.* Panorama atual sobre o biodiesel no Brasil e o aproveitamento de microalgas como fonte de matéria-prima. **Revista Engenharia em Ação UniToledo**, [s.l.], v. 3, n. 1, p. 105-117, 2018.

GARCIA, M. M. *et al.* Condutividade elétrica e porcentagem de germinação de híbridos de canola em função de épocas de semeadura. In: ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 5., 2017, Maringá. **Anais [...]**. Maringá: UNICESUMAR – Centro Universitário de Maringá, 2017.

GAZZONI, D. L. *et al.* Balanço energético da cultura da canola para a produção de biodiesel. **Espaço Energia**, [s.l.], v. 11, n. 1, p. 24-28, 2009.

GEMPERLINE, P. **Practical guide to chemometrics**. 2. ed. New York: CRC press, 2006. 552 p.

- GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: ESALQ, 2009. 451 p.
- GULARTE, J. A.; MACEDO, V. G. K.; PANOZZO, L. E; Canola seed production and market in Brazil. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, [s.l.], v.13, p. 5834-1-9, 2020.
- GUO, Y. *et al.* Genetic effects and genotype× environment interactions govern seed oil content in *Brassica napus* L. **BMC genetics**, [s.l.], v. 18, n. 1, p. 1-11, 2017.
- GUPTA, S. K. **Advances in Botanical Research: Rapeseed Breeding**. 1. ed. San Diego: Academic Press, 2007. V. 45. 553 p.
- GUPTA, S. K. **Technological Innovations in Major World Oil Crops: Breeding**. New York: Springer Science & Business Media, 2012. V.1. p. 405.
- HERTEL, K. Module 7: Harvest management. In: **Better Canola - Canola Technology Update for growers and advisors**. Australian Oilseeds Federation, v. 2, p. 6-65, 2012.
- HOM, N. H.; BECKER, H. C.; MÖLLERS, C. Non-destructive analysis of rapeseed quality by NIRS of small seed samples and single seeds. **Euphytica**, [s.l.], v. 153, n. 1, p. 27-34, 2007.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Sisdagro: Sistema de Suporte à Decisão na Agropecuária**. Disponível em: <http://sisdagro.inmet.gov.br>. Acesso em: 16 fev. 2021.
- ITO, M. A. *et al.* Efeito de épocas de semeadura sobre o desempenho de genótipos de canola em Dourados, MS. In: SIMPÓSIO LATINO AMERICANO DE CANOLA, 2014. Passo Fundo. **Anais [...]**. Passo Fundo, Embrapa Agropecuária Oeste congresso (ALICE), 2014.
- IUPAC. International Union of Pure and Applied Chemistry. **Standard methods for the analysis of oils, fats and derivatives**. Oxford: IUPAC, 1979. 1360 p.
- JASPER, M.; POLANSKI, A. C. Épocas de semeadura em diferentes híbridos de canola. **Revista Scientia Rural**, [s.l.], v. 1, 2019.
- JIANG, G-L. Comparison and application of non-destructive NIR evaluations of seed protein and oil content in soybean breeding. **Agronomy**, [s.l.], v. 10, n. 1, p. 77, 2020.
- KAEFER, J. E. *et al.* Produtividade de grãos e componentes de produção da canola de acordo com fontes e doses de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 49, n. 4, p. 273-280, 2014.
- KARMAKAR, A. *et al.* Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 101, n. 19, p. 7201-7210, 2010.
- KAUR, B.; SANGHA, M. K.; KAUR, G. Development of near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) calibration model for estimation of oil content in *Brassica juncea* and *Brassica napus*. **Food Analytical Methods**, [s.l.], v. 10, n. 1, p. 227-233, 2017.

KAUVA, J. et al. Predição do teor de óleo em aquênios de girassol por espectroscopia da reflectância do infravermelho próximo. *In: JORNADA ACADÊMICA DA EMBRAPA SOJA*, 14., 2019, Londrina. **Anais [...]**. Londrina: 2019. Embrapa Soja (ALICE).

KHAYAT, M.; LACK, S.; KARAMI, H. Correlation and path analysis of traits affecting grain yield of canola (*Brassica napus* L.) varieties. **J. Basic. Appl. Sci. Res**, [s.l.], v. 2, n. 6, p. 5555-5562, 2012.

KIIHL, T. A. M.; G. O. TOMM. Banco de Germoplasma de Canola da Embrapa: conservação e multiplicação de acessos. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CANOLA*, 1., 2017, Passo Fundo. **Anais [...]**. Passo Fundo, 2017. Embrapa Trigo (ALICE).

KRISHNA, K. R. **Agroecosystems: soils, climate, crops, nutrient dynamics and productivity**. 1. ed. New York: Apple Academic Press, 2013. 522 p.

KRÜGER, C. A. M. B. *et al.* Relações de variáveis ambientais e subperíodos na produtividade e teor de óleo em canola. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 44, n. 9, p. 1671-1677, 2014.

KRÜGER, C. A. M. B. *et al.* Herdabilidade e correlação fenotípica de caracteres relacionados à produtividade de grãos e à morfologia da canola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 46, n. 12, p. 1625-1632, 2011.

LAVIOLA, B. G. *et al.* **Performance de genótipos de canola nas condições de Cerrado**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E), 2019.

LEITE, W. De S. *et al.* Estimativas de parâmetros genéticos e correlações entre caracteres agronômicos em genótipos de soja. **Nativa**, [s.l.], v. 3, n. 4, p. 241-245, 2015.

LILLEY, J. M. *et al.* Defining optimal sowing and flowering periods for canola in Australia. **Field Crops Research**, [s.l.], v. 235, p. 118-128, 2019.

LIMA, L. H. da S. *et al.* Adaptability and stability of canola hybrids in different sowing dates. **Ciência Agronômica**, [s.l.], v. 48, n. 2, p. 374-380, 2017.

LOGANES, C. *et al.* Main Properties of Canola Oil Components: A Descriptive Review of Current Knowledge. **The Open Agriculture Journal**, [s.l.], v. 10, n.1, p. 69-74, 2016.

LOHUMI, S. *et al.* A review of vibrational spectroscopic techniques for the detection of food authenticity and adulteration. **Trends in Food Science & Technology**, [s.l.], v. 46, n. 1, p. 85-98, 2015.

LONG, D. S. *et al.* In-stream measurement of canola (*Brassica napus* L.) seed oil concentration using in-line near infrared reflectance spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, [s.l.], v. 20, n. 3, p. 387-395, 2012.

LOPES, A. C. D. A. *et al.* Variabilidade e correlações entre caracteres em cruzamentos de soja. **Scientia Agricola**, [s.l.], v. 59, n. 2, p. 341-348, 2002.

- LUCAS, C. P. *et al.* Yield response of canola (*Brassica napus* L.) to different inter-row spacings and sowing dates in northwest of Paran, Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, [s.l.], v. 11, n. 39, p. 3799-3805, 2016.
- LUZ, G. L. D. *et al.* Temperatura base inferior e ciclo de híbridos de canola. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 42, n. 9, p. 1549-1555, 2012.
- MACHADO, G. da S. *et al.* Desempenho agrônômico e produtivo de girassol em diferentes épocas de semeadura e arranjos espaciais de planta em Plantio Direto. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, [s.l.], v. 4, n. 1, p. 276-296, 2020.
- MALI, R. D. *et al.* Estimation of Stability Parameter for Yield and Yield Contributing Characters in Sesame (*Sesamum indicum* L.). **Journal of Agriculture and Veterinary Science**, [s.l.], v. 8, n. 7, p. 49-50, 2015.
- MARJANOVIĆ-JEROMELA, A. *et al.* Correlation and path analysis of quantitative traits in winter rapeseed (*Brassica napus* L.). **Agriculturae Conspectus Scientificus**, [s.l.], v. 73, n. 1, p. 13-18, 2008.
- MCKEON, T. *et al.* **Industrial Oil Crops**. 1. ed. [s.l.]: Elsevier, 2016. 474 p.
- MECOZZI, M.; PIETROLETTI, M.; TORNAMBÈ, A. Molecular and structural characteristics in toxic algae cultures of *Ostreopsis ovata* and *Ostreopsis* spp. evidenced by FTIR and FTNIR spectroscopy. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, [s.l.], v. 78, n. 5, p. 1572-1580, 2011.
- MICUANSKI, V. C. *et al.* A cultura energética - Canola (*Brassica napus* L.). **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 3, n. 2, p. 141-149, 2014.
- MÖLLERS, C. Rapeseed/Canola. *In: Genetic Modification of Plants Biotechnology in Agriculture and Forestry*, Springer, v. 64, p. 409-422, 2009.
- MONTGOMERY, D. C.; PECK, E. A. **Introduction to linear regression analysis**. New York: J. Wiley, 1981. 504 p.
- NADERI, R.; TOORCHI M. Path analysis of the relationships between yield and some related traits in canola (*Brassica napus* L.) under salinity stress conditions. **Annals of Biological Research**, [s.l.], v. 3, n. 4, p. 1731-1734, 2012.
- NERY-SILVA, F. A. *et al.* Desempenho agrônômico de genótipos de canola (*Brassica napus*) na região do Cerrado do Triângulo Mineiro. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CANOLA*, 1., 2017, Passo Fundo. **Anais [...]**. Passo Fundo: Embrapa Trigo-Artigo (ALICE), 2017a.
- NERY-SILVA, F. A. *et al.* Desempenho agrônômico de híbridos de canola (*Brassica napus*) cultivados em Uberlândia, MG. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CANOLA*, 1., 2017, Passo Fundo. **Anais [...]**. Passo Fundo: Embrapa Trigo (ALICE), Passo Fundo, 2017b.
- NETO, A. J. S. *et al.* Non-destructive prediction of pigment content in lettuce based on visible-NIR spectroscopy. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s.l.], v. 97, n. 7, p. 2015-2022, 2017.

- NETO, F. de A. *et al.* Análise de trilha do rendimento de grãos de soja na microrregião do Alto Médio Gurguéia. **Comunicata Scientiae**, [s.l.], v. 2, n. 2, p. 107-112, 2011.
- NOGUEIRA, A. P. O. *et al.* Análise de trilha e correlações entre caracteres em soja cultivada em duas épocas de semeadura. **Bioscience Journal**, [s.l.], v. 28, n. 6, p. 877-888, 2012.
- OSAKI, M.; BATALHA M. O. Biodiesel and vegetable oil production in Brazil: reality and challenge. **Organizações Rurais e Agroindustriais**, [s.l.], v. 13, n. 2, p. 227-242, 2011.
- PANOZZO, L. E. *et al.* Evaluation of some hybrids of canola in function of sowing dates in Viçosa, MG, Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, [s.l.], v. 9, n. 32, p. 2488-2494, 2014.
- PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives—A review. **Analytica Chimica Acta**, [s.l.], v. 1026, p. 8-36, 2018.
- PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, [s.l.], v. 14, n. 2, p. 198-219, 2003.
- PEIXOTO, C. P. *et al.* Épocas de semeadura e densidade de plantas de soja: I. Componentes da produção e rendimento de grãos. **Scientia Agricola**, [s.l.], v. 57, n. 1, p. 89-96, 2000.
- PERES, J. R. R. *et al.* Biocombustíveis uma oportunidade para o agronegócio brasileiro. **Revista de Política Agrícola**, [s.l.], v. 14, n. 1, p. 31-41, 2005.
- PETISCO, C. *et al.* Measurement of quality parameters in intact seeds of Brassica species using visible and near-infrared spectroscopy. **Industrial Crops and Products**, [s.l.], v. 32, n. 2, p. 139-146, 2010.
- POLLITT, K. J. G. *et al.* Biodiesel fuels: A greener diesel? A review from a health perspective. **Science of The Total Environment**, [s.l.], v. 688, n. 1, p. 1036-1055, 2019.
- POREP, J. U. *et al.* On-line application of near infrared (NIR) spectroscopy in food production. **Trends in Food Science & Technology**, [s.l.], v. 46, n. 2, p. 211-230, 2015.
- POTTER, T. D. **Canola**: best practice management guide for south-eastern Australia. Canberra: Grains Research and Development Corporation, 92 p., 2009.
- PRITCHARD, F. *et al.* **Over the Bar with Better Canola Agronomy**: Demonstration and Trail Results, Crop Establishment Case Studies. Grains Research and Development Corporation, 2010. 35 p.
- PRZYBYLSKI, R.; ESKIN, N. M. Oil nutrition and utilization. *In*: **Canola**. [s.l.]: Elsevier, 2011. p. 189-227.
- PUA, E. C.; DAVEY M. R. **Transgenic crops V**. New York: Springer Science & Business Media, 2007. V. 60. 563 p.
- RAHMAN, H. Review: Breeding spring canola (*Brassica napus* L.) by the use of exotic germplasm. **Canadian Journal of Plant Science**, [s.l.], v. 93, n. 3, p. 363-373, 2013.

RAMALHO, M. A. P. *et al.* **Aplicações da genética quantitativa no melhoramento de plantas autógamas.** 1 ed. Lavras: UFLA, 2012. v. 1, 522 p.

RAMALHO, M. A. P. *et al.* **Genética quantitativa em plantas autógamas:** aplicações ao melhoramento do feijoeiro. Goiânia: UFG, 1993. 271 p.

RAMAN, H. *et al.* Genetic Solutions to Improve Resilience of Canola to Climate Change. *In: Genomic Designing of Climate-Smart Oilseed Crops.* [s.l.]: Springer, 2019. p.75-131.

RAMEEH, V. Correlation and path analysis in advanced lines of rapeseed (*Brassica napus*) for yield components. **Journal of Oilseed Brassica**, [s.l.], v. 1, n. 2, p. 56-60, 2016.

RAPOSO, R. W. C. *et al.* Épocas de semeadura de genótipos de canola (*Brassica napus* L. var. *Oleifera*) em três anos de cultivo no estado da Paraíba. *In: CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA*, 2016, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**, Foz do Iguaçu, 29 de agosto a 1 de setembro de 2016.

R CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing.** Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2015. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 05 mar. 2020.

RIGHI, E. Z. *et al.* Sowing times influence canola grain yield and oil quality. **Agrometeoros**, [s.l.], v. 25, n. 2, p. 415-425, 2018.

RIGON, C. A. G. *et al.* Características agronômicas, rendimento de óleo e proteína de canola em diferentes épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Tecnologia Agropecuária**, [s.l.], v. 1, n. 2, p. 124-132, 2017.

ROBERTS, C. A. *et al.* **Near-infrared spectroscopy in agriculture.** Madison: American Society of Agronomy, 2004. V. 44.

ROCHA, L. de S. *et al.* Análise de trilha para produtividade de grãos em canola no Cerrado. *In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA E INOVAÇÃO DE BIODIESEL*, 7., 2019, Florianópolis. **Anais [...]**, Florianópolis: Embrapa Agroenergia (ALICE), 2019.

ROSA, W. B. *et al.* Influência de épocas de semeadura nos subperíodos e desempenho agrônomo de híbridos de canola. **Brazilian Journal of Development**, [s.l.], v. 6, n. 9, p. 65774-65788, 2020a.

ROSA, W. B. *et al.* Otimização da produtividade agrônomo da canola submetida a diferentes doses de potássio no florescimento. **Revista Engenharia na Agricultura**, [s.l.], v. 28, p. 389-396, 2020b.

ROSSATO, R. *et al.* Predição do teor de óleo em sementes de canola por espectroscopia de infravermelho próximo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [s.l.], v. 48, n. 12, p. 1601-1605, 2013.

SALISBUURY, P.; WRATTEN, N. *Brassica napus* breeding. **Canola in Australia: the first**, [s.l.], v. 30, p. 29-36, 1999.

- SANDAK, J.; SANDAK, A.; MEDER, R. Assessing trees, wood and derived products with near infrared spectroscopy: hints and tips. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, [s.l.], v. 24, n. 6, p. 485-505, 2016.
- SEABRA JÚNIOR, E. S. *et al.* Estudo sobre a cultura de canola (*Brassica napus* L.) no contexto de culturas energéticas. **Acta Iguazu**, [s.l.], v. 6, n. 5, p. 140-146, 2017.
- SEN, R. *et al.* Near-infrared reflectance spectroscopy calibrations for assessment of oil, phenols, glucosinolates and fatty acid content in the intact seeds of oilseed Brassica species. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [s.l.], v. 98, n. 11, p. 4050-4057, 2018.
- SIDHU, H. K.; HAAGENSON, D. M.; WIESENBORN, D. P. Nondestructive analysis of single plant canola (*Brassica napus*) seeds using near infra-red spectroscopy. *In: American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) Annual International Meeting*, Dallas, 2012.
- SIEMENS, B. J.; DAUN, J. K. Determination of the fatty acid composition of canola, flax, and solin by near-infrared spectroscopy. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, [s.l.], v. 82, n. 3, p. 153-157, 2005.
- SILVA, P. R. F.; FREITAS, T. F. S. Biodiesel: o ônus e o bônus de produzir combustível. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 38, n. 3, p. 843-851, 2008.
- SILVA, L. F. L. *et al.* Energy balance of biodiesel production from canola. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 47, n. 2, 2017.
- SNOWDON; LÜHS; FRIEDT. Oilseed rape. *In: Oilse - Genome Mapping and Molecular Breeding in Plantseds*. [s.l.]: Springer, 2007. V. 2. p. 55-114.
- SOUZA, S. P. *et al.* Feedstocks for biodiesel production: brazilian and global perspectives. **Biofuel**, [s.l.], v. 9, n. 4, p. 455-478, 2017.
- STEEL, R. G. D.; TORRIE, J. H.; DICKY, D. A. **Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach**. 3. ed. New York: MacGraw-Hill Book Company, 1997. 688 p.
- SÜZER, S. Effects of plant nutrition on canola (*Brassica napus* L.) growth. **Trakya University Journal of Natural Sciences**, [s.l.], v. 16, n. 2, p. 87-90, 2015.
- TAPANES, N. *et al.* Biodiesel no Brasil: matérias primas e tecnologias de produção. **Acta Scientiae e Technicae**, [s.l.], v. 1, n. 1, p. 119-125, 2013.
- THIYAM-HOLLÄNDER, U. *et al.* **Canola and rapeseed**: production, processing, food quality, and nutrition. 1. ed. New York: CRC Press, 2012. 362 p.
- TOMM, G. O. Canola: alternativa de renda e benefícios para os cultivos seguintes. **Revista Plantio Direto**, [s.l.], v. 15, n. 94, p. 4-8, 2006.
- TOMM, G. O. *et al.* **Tecnologia para a produção de canola no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009. (Documentos INFOTECA-E).

TOMM, G. O. **Indicativos tecnológicos para produção de canola no Rio Grande do Sul**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006. (Sistema de Produção INFOTECA-E).

TOMM, G. O. *et al.* **Efeito de épocas de semeadura sobre o desempenho de genótipos de canola de ciclo precoce e médio**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2010. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento INFOTECA-E).

TOMM, G. O. *et al.* **Panorama atual e indicações para aumento de eficiência da produção de canola no Brasil**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2009b. (Documentos INFOTECA-E).

TURHAN, H. *et al.* Effect of sowing time on grain yield, oil content, and fatty acids in rapeseed (*Brassica napus* subsp. *oleifera*). **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, [s.l.], v. 35, n. 3, p. 225-234, 2011.

USDA. United States Department of Agriculture. **Oilseeds: World Markets and Trade 2021**. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/oilseeds.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2021a.

USDA. United States Department of Agriculture. **World Agricultural Production**. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>. Acesso em: 11 fev. 2021b.

VALE, L. *et al.* **Complexo Agroindustrial de Biodiesel no Brasil: Competitividade das Cadeias Produtivas de Matérias-primas**. 1. ed. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2012. 712 p.

VARGAS, M. *et al.* Interpreting treatment x environment interaction in agronomy trials. **Agronomy Journal**, USDA, v. 93, n. 4, p. 949-960, 2001.

VASCONCELOS, M. C. *et al.* Diferenciação de cultivares de girassol por espectroscopia no infravermelho próximo e análise multivariada, utilizando sementes e óleo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, [s.l.], v. 13, n. 4, p. 5582, 2018.

VELASCO, L. *et al.* Estimation of seed weight, oil content and fatty acid composition in intact single seeds of rapeseed (*Brassica napus* L.) by near-infrared reflectance spectroscopy. **Euphytica**, [s.l.], v. 106, n. 1, p. 79-85, 1999.

VENCOVSKY, R.; BARRIGA P. **Genética biométrica no fitomelhoramento**. Ribeirão Preto: Revista Brasileira de Genética, 1992. 496 p.

WAN, L. *et al.* Rapid determination of oil quantity in intact rapeseeds using near-infrared spectroscopy. **Journal of Food Process Engineering**, [s.l.], v. 41, n. 1, p. e12594, 2018.

WANASUNDARA, J. P. Proteins of Brassicaceae oilseeds and their potential as a plant protein source. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, [s.l.], v. 51, n. 7, p. 635-77, 2011.

WESTAD, F.; MARTENS, F. Variable selection in near infrared spectroscopy based on significance testing in partial least square regression. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, [s.l.], v. 8, n. 1, p. 117-124, 2000.

WILLIAMS, P.; ANTONISZYN, J.; MANLEY, M. **Near-infrared technology: Getting the best out of light**. 1 ed. África do Sul: African Sun Media, 2019. 311 p.

WORKMAN JR, J.; SHENK J. Understanding and using the near-infrared spectrum as an analytical method. **Near-infrared Spectroscopy in Agriculture**, [s.l.], v. 44, p. 1-10, 2004.

WORKMAN JR., J.; WEYER, L. **Practical Guide and Spectral Atlas for Interpretive Near Infrared Spectroscopy**. 2 ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. 326 p.

WRIGHT, S. Correlation and causation. **Journal of Agricultural Research**, [s.l.], v. 20, n. 7, p. 557-585, 1921.

WRIGHT, S. The theory of path coefficients a reply to Niles's criticism. **Genetics**, [s.l.], v. 8, n. 3, p. 239-255, 1923.

XU, X.; XIE, L.; YING, Y. Factors influencing near infrared spectroscopy analysis of agro-products: a review. **Frontiers of Agricultural Science and Engineering**, [s.l.], v. 6, n. 2, p. 105-115, 2019.

XU, Y. D.; ZHOU, Y. P.; CHEN, J. Near-Infrared spectroscopy combined with multivariate calibration to predict the yield of sesame oil produced by traditional aqueous extraction process. **Journal of Food Quality**, [s.l.], v. 1, n. 5, 2017. 2017.

ZAJAC, T. *et al.* Análise do rendimento e características das plantas de colza (*Brassica napus* L.) cultivadas em região temperada, à luz das possibilidades de semeadura em áreas áridas. **Acta Agrobotanica**, [s.l.], v. 69, n. 4, p. 1-13, 2016.

ZHU, Z. *et al.* Determination of soybean routine quality parameters using near-infrared spectroscopy. **Food Science & Nutrition**, [s.l.], v. 6, n. 4, p. 1109-1118, 2018.