

A ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO PRÓXIMO PODE SER
UTILIZADA PARA A SELEÇÃO DE LINHAGENS DE MILHO-PIPOCA
SUPERIORES EM CONDIÇÃO DE SECA?

JACYMARA LOPES PEREIRA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2023

A ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO PRÓXIMO PODE SER
UTILIZADA PARA A SELEÇÃO DE LINHAGENS DE MILHO-PIPOCA
SUPERIORES EM CONDIÇÃO DE SECA?

JACYMARA LOPES PEREIRA

“Dissertação apresentada ao Centro de
Biotecnologia e Biotecnologia da
Universidade Estadual do Norte
Fluminense Darcy Ribeiro, como parte
das exigências para obtenção do título
de Mestre em Biotecnologia Vegetal.”

Orientador: Prof. Antônio Teixeira do Amaral Junior

Co-orientador: Dr. Samuel Henrique Kamphorst

FICHA CATALOGRÁFICA
UENF - Bibliotecas
Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

P436

Pereira, Jacymara Lopes.

A ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO PRÓXIMO PODE SER UTILIZADA PARA A SELEÇÃO DE LINHAGENS DE MILHO-PIPOCA SUPERIORES EM CONDIÇÃO DE SECA? /

Jacymara

Lopes Pereira. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2023.

51 f. : il.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Biociências e Biotecnologia, 2023.

Orientador: Antonio Teixeira do Amaral Junior. Coorientador:

Samuel Henrique Kamphorst.

1. NIR. 2. capacidade de expansão. 3. estresse hídrico. 4. estágio fenológico. 5. melhoramento genético. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II.

Título.

CDD -

A ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO PRÓXIMO PODE SER
UTILIZADA PARA A SELEÇÃO DE LINHAGENS DE MILHO-PIPOCA
SUPERIORES EM CONDIÇÃO DE SECA?

JACYMARA LOPES PEREIRA

“Dissertação apresentada ao Centro de
Biotecnologia e Biotecnologia da
Universidade Estadual do Norte

Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Biotecnologia Vegetal.”

Aprovada em 09 de fevereiro de 2023.

Comissão Examinadora:

Weverton Pereira Rodrigues

Prof. Dr. Weverton Pereira Rodrigues (D.Sc., Produção Vegetal) – UEMASUL

Cibele Maria Stivanin de Almeida

Prof^ª. Dra. Cibele Maria Stivanin de Almeida (D.Sc., Química) – UENF

Valter Jário de Lima

Dr. Valter Jário de Lima (D.Sc., Genética e Melhoramento de Plantas) – UENF

Samuel H. Kamphorst

Dr. Samuel Henrique Kamphorst (D.Sc., Genética e Melhoramento de Plantas) – UENF
(Co-orientador)



Prof. Antonio Teixeira do Amaral Junior
LMGV - CCTA - UENF
Mat.: 527-2 / ID.: 641214-9

Prof. Dr. Antônio Teixeira do Amaral Junior (D.Sc., Genética e Melhoramento) – UENF
(Orientador)

“A vida presenteia aqueles que têm coragem de viver de acordo com
seus valores e princípios” – Autor Desconhecido

A Deus e a minha família.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por ter me guiado, me abençoado, me iluminado e por ter me dado sabedoria para conseguir lidar com todo o processo. Sem as suas bênçãos, com certeza, eu não teria conseguido chegar até aqui.

Bom, em segundo lugar eu gostaria de agradecer enormemente a minha família em especial ao meu pai, Everaldo e a minha mãe, Aldiléa. Por ter me dado todo suporte durante toda a minha trajetória, não só no mestrado, mas durante toda a minha vida acadêmica, pessoal e profissional. Hoje posso afirmar que se não fosse por eles eu não teria conseguido. Ao meu pai, por ter sido a minha fortaleza quando inúmeras vezes estava cansada e a minha mãe, por sempre ter me escutado e me auxiliado em todo processo. Agradeço também ao meu irmão José, que mesmo sem entender e sem saber a sua importância em minha vida foi fundamental nesse processo me dando força. E a minha irmã, Jacyara, por ter compartilhado comigo a experiência de um mestrado.

Não poderia faltar o agradecimento ao meu braço direito ao longo do meu mestrado a Danielle Leal Lamego, você se tornou uma grande amiga e uma grande irmã, hoje digo que se não fosse a força que criamos ao longo do mestrado, eu não teria conseguido. Você fez e faz parte disso desde a implementação do experimento até o processamento dos dados. Deixo aqui registrado toda a minha admiração por você, mulher guerreira, forte e imbatível, sinto muito orgulho de você, sempre! Parte desse título pertence a ti.

Gostaria de agradecer enormemente ao professor Antônio Teixeira do Amaral Júnior, por me receber de braços abertos em seu laboratório quando o meu sonho era levar um experimento para o campo, afim de retomar sempre as minhas raízes. Também gostaria de agradecer enormemente pelos ensinamentos.

Ao Samuel Kamphorst deixo um agradecimento especial por toda co-orientação e participação ativa ao longo do processo, a você meu muito obrigada!

Ao Jhean Leite, deixo meu agradecimento por todos os ensinamentos de como conduzir um experimento no campo e por toda prontidão ao me ajudar, parte de todo processo devo a você.

Ao Guilherme Pena, deixo um agradecimento especial por toda ajuda no laboratório no período em que estive conosco. Agradeço por todo ensinamento e sabedoria, a você Guilherme, meu MUITO OBRIGADA!

A todos meus colegas de laboratório, muito obrigada! Obrigada pelo carinho, pelos ensinamentos e pela paciência. E também a todo grupo do laboratório de Fisiologia Vegetal – UENF, por toda disponibilidade e auxílio, em especial ao Prof. Dr. Eliemar Campostrini.

Aos meus amigos, Walaci Santos, Fernanda Coelho e Juliana Moraes, muito obrigada! Obrigada por serem apoio sempre que precisei, eu jamais esquecerei e para sempre serei grata.

Dentro desses amigos e parceiros trago meu agradecimento especial ao Iago Barros, que se tornou um grande amigo que o mestrado me deu, você que foi não somente apoio emocional, mas foi fortaleza, foi experiência e foi o real significado de parceria ao analisar todos os dados espectrais. Você é uma cara incrível que tenho muito orgulho em ter trabalhado junto, muito obrigada mesmo!

Por fim, gostaria de agradecer enormemente a UENF, por ter me formado como profissional e como cidadã. Afinal, ao ingressar nessa Universidade aos 17 anos, encaro que o fim do mestrado seja um até logo. Destaco também ao Programa de Biotecnologia Vegetal, por todo ensinamento ao longo da minha trajetória na pós-graduação.

A todos vocês que fizeram parte da minha trajetória, MUITO OBRIGADA!

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AM: Antese masculina

BAG: Banco ativo de germoplasma

CE: Capacidade de expansão

CVe (%): Coeficiente de variação experimental (em porcentagem)

CIMMYT: Centro Internacional de Melhoramento de Milho e Trigo

CH: Condição hídrica

DAS: Dias após a semeadura

DP: Desvio-padrão

G: Genótipo

IAC: Instituto Agronômico de Campinas

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

Kg ha⁻¹: Quilograma por hectare

MAPA: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

mL g⁻¹: Mililitro por grama

mm: milímetro

QM: Quadrado médio

PLS: Método dos mínimos quadrados parciais

RG: Rendimento de grãos

RNC: Registro Nacional de Cultivares

RMSE: Raiz quadrada do erro médio

RMSEP: Root Mean Square Error of Prediction (Raiz quadrada do erro médio de predição)

RMSEC: Root Mean Square Error of Calibration (Raiz quadrada do erro médio de calibração)

SNV: Standard Normal Variate

UENF: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

VP: Volume da pipoca expandida por hectare

WS: Water-stressed (estresse hídrico)

WW: Well-watered (irrigação plena)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Condições ambientais (umidade relativa, radiação fotossinteticamente ativa e temperatura média) observadas durante o cultivo do milho-pipoca em 2021.

Figura 2 – Potencial hídrico do solo durante o cultivo de milho-pipoca em condições hídricas contrastantes (WS e WW).

Figura 3 – Acurácia média das 30 rodadas do modelo LDA para classificação da condição hídrica aplicada na cultura do milho-pipoca cultivada em 2021.

Figura 4 – Acurácia média das 30 rodadas do modelo LDA para classificação decorrente da antecedência ou a posterior na antese masculina de diferentes datas para duas condições hídricas aplicadas na cultura no milho-pipoca na safra de 2021.

Figura 5 – Acurácia média de 30 rodadas do modelo para a classificação da condição hídrica aplicada decorrente das avaliações anteriores e posteriores à antese masculina para a cultura do milho-pipoca cultivada em 2021.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das linhagens de milho-pipoca e informações quanto à genealogia, procedência, adaptação climática e ciclo.

Tabela 2 – Precipitação e irrigação (mm) aplicada nos genótipos precoces e tardios na condição WW e WS, considerando-se os dias após a semeadura (DAS).

Tabela 3 – Resumo da análise de variância dos ambientes e médias gerais de caracteres agrônômicos de linhagens de milho-pipoca em condições bem-irrigada (WW) e de déficit hídrico (WS).

Tabela 4 – Médias e teste de médias de características agrônômicas de linhagens de milho-pipoca avaliadas em diferentes condições hídricas.

Tabela 5 – Modelos de regressão sem tratamento, com pré-processamento SNV, primeira derivada com ordem e janela de sete pontos, e SNV + primeira derivada para os fatores agrônômicos RG, CE e VP correlacionados aos espectros de NIR.

Tabela 6 – Índices de previsão e sensibilidade para testar as condições hídricas aplicadas na cultura no milho-pipoca cultivada em 2021.

Tabela 7 – Matriz de confusão com modelos preditivos de erro e acerto entre as classes WS e WW (dados em %) utilizando os espectros de NIR obtidos de diferentes condições hídricas aplicadas na cultura do milho-pipoca cultivada em 2021.

Tabela 8 – Índices de precisão e sensibilidade para testar classes (dias) decorrentes da antecedência ou a posterior da antese masculina na classificação de diferentes datas avaliadas em duas condições hídricas aplicadas na cultura no milho-pipoca cultivada em 2021.

Tabela 9 – Matriz de confusão com modelos preditivos de erro e acerto entre as classes (dias) decorrentes da antecedência ou a posteriori na antese masculina (dados em %) utilizando os dados de espectrais de NIR obtidos de diferentes datas de avaliação em milho-pipoca cultivado em 2021.

Tabela 10 – Índices de previsão e sensibilidade para testar a classificação da condição hídrica aplicada e as classes (dias) decorrentes da antecedência ou *a posteriori* à antese masculina com classificação em diferentes datas e em duas condições hídricas aplicadas na cultura no milho-pipoca cultivada em 2021.

Tabela 11 – Matriz de confusão com modelos preditivos de erro e acerto para a classificação da condição hídrica aplicada, bem como as classes (dias) decorrentes das avaliações antecedentes e posteriores à antese masculina para a cultura do milho-pipoca cultivada em 2021.

RESUMO

O déficit hídrico no solo é considerado uma condição de estresse abiótico grave, que restringe em grande escala a produtividade agrícola mundial. Com isso, identificar características de forma precoce que sejam associadas à aclimação a seca em milho-pipoca contribui para a seleção de genótipos tolerantes ao déficit hídricos e/ou eficientes no uso da água. O espectro de infravermelho próximo (NIR) tem sido utilizado para a identificação de compostos orgânicos e inorgânicos, abrindo oportunidades para a discriminação de regimes hídricos e para a seleção de plantas. O presente trabalho teve como base as seguintes indagações: i) a variabilidade genética detectada em caracteres agronômicos de rendimento de grãos (RG), capacidade de expansão (CE) e volume de pipoca expandida por hectare (VP) pode ser associada às estimativas de espectro do NIR e, assim, ser possível a seleção indireta via espectroscopia? ii) haveria a possibilidade de se detectar diferenças entre as condições hídricas distintas aplicadas ao solo via NIR? iii) seria possível identificar os estádios fenológicos do milho-pipoca via NIR, cultivado em condições hídricas contrastantes, uma vez que as transformações morfofisiológicas ocorrem nas plantas durante o seu desenvolvimento? Para investigar esses questionamentos, foram utilizadas treze linhagens S_7 de milho-pipoca com capacidade de expansão superior a 25 mL g^{-1} , para as quais avaliou-se o impacto do estresse hídrico em relação às características RG, CE e VP, correlacionando-as com os índices espectrais do infravermelho próximo (NIR), com espectro de 908 a 1680nm. As linhagens foram cultivadas sob as condições hídricas (CH) de irrigação plena (WW) – caracterizada pela manutenção da capacidade de campo até o final do ciclo – e de estresse hídrico (WS), que se configurou pela suspensão da irrigação no estágio da pré-antese masculina, perdurando até a colheita. Em cada condição hídrica, o delineamento experimental utilizado foi blocos completos casualizados (DBC), com três repetições para cada parcela. Para a obtenção espectral foram realizadas cinco mensurações do espectro de NIR em duas partes do colmo das plantas de milho-pipoca, a saber: próximo da raiz, acima da linha do solo, e próximo da espiga principal, mais especificamente na região mediana da planta. As mensurações ocorreram após a imposição do déficit hídrico em relação à antese masculina, sendo elas a -19, -6, antes da antese masculina 3, 11 e 23 após a antese masculina. Na colheita, estimaram-se as características agronômicas RG, CE e VP. Como resultados, essas características apresentaram diferenças estatísticas na análise individual para ambiente e na análise conjunta para a interação genótipo*condição hídrica. Não foi possível associar os

espectros de NIR às características RG, CE e VP, devido à ausência de correlação com base nos valores de R^2 decorrentes da análise de SNV, 1ª derivada e SNV + 1ª derivada, afim de ajustar o espectro a linha de base. Por sua vez, a CH, o estágio fenológico em relação a antese masculina e o somatório CH + estágio fenológico possibilitaram associações, tornando-se opções para a discriminação da adaptação de genótipos ao déficit hídrico. Com isso, foi possível diferenciar, via NIR, as condições hídricas aplicadas e associar o estágio fenológico no qual a planta se apresentava. A linhagem L217 expressou maiores estimativas de RG e VP, entretanto, menor valor de CE em condição de seca. Já as linhagens L220, L510 e L684 apresentaram maiores estimativas de CE em WS, sendo, pois, genitores de interesse para serem utilizados em programas de melhoramento com o intuito de aumentar a capacidade de expansão do milho-pipoca. Apesar de não se conseguir resultados satisfatórios na correlação dos espectros para com as características RG, CE e VP, julgam-se oportunos novos estudos que permitam uma melhor padronização na obtenção dos dados e que contemplem a utilização de um maior número de genótipos, de modo que seja possível vislumbrar a discriminação espectral via NIR de características de rendimento e de qualidade dos grãos.

Palavras-chave: NIR, capacidade de expansão, estresse hídrico, estágio fenológico.

ABSTRACT

Soil water deficit is considered a condition of severe abiotic stress, which greatly restricts world agricultural productivity. Thus, identifying early traits that are associated with drought acclimatization in popcorn contributes to the selection of genotypes tolerant to water deficit and/or efficient in water use. The near infrared (NIR) spectrum has been used for the identification of organic and inorganic compounds, opening opportunities for the deficiency of water regimes and for the selection of plants. The present work was based on the following questions: i) the genetic variability detected in agronomic traits of grain yield (RG capacity), expansion (EC) and volume of popped popcorn per hectare (VP) can be associated with expectations of spectrum of the NIR and, thus, be possible the indirect selection via spectroscopy? ii) would it be possible to detect the difference between different water conditions applied to the soil via NIR? iii) would it be possible to identify the phenological stages of popcorn via NIR, cultivated in contrasting water conditions, since morphophysiological transformations occur in plants during their development? For these questions, thirteen S7 popcorn lines with an expansion capacity greater than 25 mL g⁻¹ were used to evaluate the impact of water stress in relation to the characteristics RG, CE and VP, correlating them with the near infrared (NIR) spectral indices, with a spectrum from 908 to 1680nm. The lines were cultivated under water conditions (CH) of full irrigation (WW) – characterized by the maintenance of field capacity until the end of the cycle – and water stress (WS), which are configured by the suspension of irrigation in the pre-season stage. -male anthesis, lasting until harvest. In each water condition, the experimental design used was randomized complete blocks (DBC), with three replications for each plot. To obtain spectra, five measurements of the NIR spectrum were carried out in two parts of the stem of popcorn plants, namely: close to the root, above the ground line, and close to the main ear, more specifically in the middle region of the plant. . Measurements took place after the imposition of water deficit in relation to male anthesis, being -19, -6, before male anthesis 3, 11 and 23 after male anthesis. At harvest, the agronomic characteristics RG, EC and VP were estimated. As a result, these characteristics differed statistically in the individual analysis for the environment and in the joint analysis for the genotype*water condition interaction. It was not possible to associate the NIR spectra with the RG, EC and VP characteristics, due to the absence of naturally based on the R² values resulting from the analysis of SNV, 1st derivative and SNV + 1st derivative, in order to adjust the spectrum to the baseline. In turn, the HC, the phenological stage in relation to male anthesis and the sum of HC + phenological stage allowed associations, becoming options for including the adaptation of genotypes

to water deficit. With this, it was possible to differentiate, via NIR, the water conditions applied and to associate the phenological stage in which the plant presented itself. Lineage L217 expresses higher estimates of RG and VP, however, lower EC value in drought condition. On the other hand, the lines L220, L510 and L684 presented the highest expected CE in WS, being, therefore, parents of interest to be used in breeding programs with the aim of increasing the expansion capacity of popcorn. Despite not obtaining forced results in the variation of the spectra for the RG, EC and VP characteristics, new studies were considered fair, which provoked a better standardization in obtaining the data and which contemplate the use of a greater number of genotypes, so that that it is possible to envisage the spectral detection via NIR of grain yield and quality characteristics.

Keywords: NIR, expansion capacity, water stress, phenological stage.

SUMÁRIO

<u>1- INTRODUÇÃO</u>	1
<u>2- OBJETIVOS</u>	5
<u>2.1 – Objetivos gerais</u>	5
<u>2.2 – Objetivos específicos</u>	5
<u>3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u>	6
<u>3.1 – Aspectos gerais do milho-pipoca e sua importância econômica</u>	6
<u>3.2 – O impacto do déficit hídrico na cultura do milho-pipoca</u>	7
<u>3.3 – Características utilizadas para a identificação de genótipos superiores em condição de déficit hídrico no solo</u>	9
<u>3.4 – Propriedades espectrais e o uso da espectroscopia em fitotecnia e melhoramento de plantas</u>	10
<u>4- REVISÃO EM BANCOS DE PROPRIEDADE INTELECTUAL</u>	11
<u>5- MATERIAIS E MÉTODOS</u>	13
<u>5.1 - Genótipos</u>	13
<u>5.2- Desenho experimental e tratos culturais</u>	13
<u>5.3 - Caracteres agronômicos</u>	16
<u>5.4 – Análises estatísticas</u>	17
<u>5.5- Espectro de NIR</u>	18
<u>5.5.1 – Aquisição das amostras biológicas</u>	18
<u>5.5.2 – Detecção dos espectros de infravermelho próximo (NIR)</u>	18
<u>5.5.3 – Pré-processamento de dados</u>	19
<u>5.5.4 – Construção da curva de calibração</u>	19
<u>5.5.5 – Aplicação do método dos mínimos quadrados parciais (PLS)</u>	20
<u>5.5.6 – Classificador via análise discriminante linear (LDA)</u>	20
<u>6- RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	22
<u>6.1 – Expressão fenotípica de linhagens de milho-pipoca nas diferentes condições hídricas</u>	22
<u>6.2 – Potencial agronômico de linhagens de milho-pipoca nas condições hídricas avaliadas</u>	25
<u>6.3 – Identificação dos espectros de NIR e construção do modelo de regressão entre os caracteres agronômicos RG, CE e VP com os índices espectrais</u>	26

<u>6.4 - Os espectros do NIR podem identificar a presença da limitação hídrica no solo e os diferentes estádios fenológicos?</u>	28
<u>6.5 - Implicações da utilização do espectro de NIR para o melhoramento de plantas</u>	35
<u>7- CONCLUSÕES</u>	37
<u>8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	38
<u>APÊNDICE</u>	46
<u>Apêndice A – Curva de padrão espectral do NIR</u>	46
<u>Apêndice B – Curva de calibração após tratamentos de SNV + 1ª derivada</u>	46

1- INTRODUÇÃO

O mercado atual de sementes oferece cultivares de milho-pipoca com elevado potencial de rendimento de grãos, entretanto, isso ocorre para condições ótimas de água no solo. Contudo, estresses abióticos, como o déficit hídrico, tem dificultado o desenvolvimento pleno de diferentes espécies (ARAUS et al., 2011; ADEBAYO et al., 2014; AHMED et al., 2015; AFSHAR et al., 2016; HUSSAIN et al., 2018; KAMPHORST et al., 2018a; NASHIRIM et al., 2020; LIMA et al., 2021; LEITE et al., 2022). Os eventos de seca vêm aumentando devido às mudanças climáticas, decorrente da concentração de gases de efeito estufa, alterando os índices pluviométricos e aumentando a temperatura global. Esses efeitos vêm interferindo negativamente no cultivo das espécies agrícolas, principalmente em regiões tropicais e subtropicais (ZIA et al., 2013, ADEBAYO et al., 2014; NASHIRIM et al., 2020), incluindo o Brasil (DURÃES et al., 2004; LEITE et al., 2022). Essas condições revelam um cenário alarmante no que diz respeito à segurança alimentar (KNUTTI et al., 2016; LUNDUKA et al., 2019). O milho-pipoca (*Zea mays* Var. Everta) não é uma exceção, sendo amplamente afetado pelo déficit hídrico no solo (KAMPHORST et al., 2018a; LIMA et al., 2019; SANTOS et al., 2021; VIANA et al., 2022).

O milho-pipoca é uma cultura altamente rentável e utilizada com exclusividade para o consumo humano, vinculada a momentos de lazer, podendo ser consumida *in natura* ou na forma de produtos industrializados (AMARAL JUNIOR et al., 2013). Por ser de baixo custo e saborosa, torna-se um produto de grande aceitação popular e de elevada rentabilidade para o produtor do grão e, também, para quem vende a pipoca. Essa cultura apresenta características morfofisiológicas peculiares, dentre elas, destacam-se: maior suscetibilidade a pragas, a doenças, menor tamanho de planta,

menor pendão e grãos reduzidos. Tais características tornam a cultura ainda mais suscetível às condições de déficit hídrico no solo, o que impacta os caracteres de maior importância econômica da espécie, a saber: rendimento de grãos (RG) e capacidade de expansão (CE) (KAMPHORST et al., 2018a; LEITE et al., 2022).

Rendimento de grãos (RG) é uma característica-alvo usada para avaliar o grau de tolerância ao déficit hídrico no solo. Já a capacidade de expansão (CE) consiste em uma característica que relaciona o volume de pipoca estourada com a massa de grãos utilizada, sendo expressa em mL g⁻¹. Essas características comumente apresentam correlação negativa, sendo que RG se expressa por efeitos gênicos de dominância e CE por efeitos gênicos aditivos (PEREIRA e AMARAL JUNIOR, 2001; POSSATO JÚNIOR et al., 2021). Sob o ponto de vista do melhoramento aplicado, o que se espera é a utilização de características que estejam correlacionadas positivamente e em elevada magnitude a RG e a CE, mas que sejam de fácil mensuração e de alta herdabilidade, constituindo, assim, em opções para auxiliar na seleção indireta de forma precoce de genótipos superiores por métodos não convencionais de estimação (MONNEVEUX et al., 2008; LIU et al., 2021).

As características morfofisiológicas e bioquímicas das plantas vêm sendo estudadas como possibilidades de utilização para a seleção indireta em condições de déficit hídrico no solo, uma vez que os eventos de redução hídrica no solo causam uma série de alterações morfológicas nas plantas, como diminuição na altura da planta, redução de biomassa, danos no sistema radicular e reprodutivo, diminuição da superfície foliar e a redução da biomassa, estando vinculadas ao fechamento estomático e à senescência precoce (LIU et al., 2021). O sistema reprodutivo, por sua vez, está relacionado com a má formação dos grãos de pólen e com a falta de nutrientes para o enchimento de grãos, bem como com a senescência foliar precoce, dentre outras. Devido a falta d'água no solo (KAUR et al., 2021; LIU e QIN, 2021; PIPATSITTEE et al., 2022).

Em nível fisiológico, percebem-se alterações, como a diminuição da pressão de turgor, diminuição da eficiência fotossintética, a redução da condutância estomática, o fechamento estomático, o que acarreta em baixa assimilação de CO₂ (KAUR et al., 2021; LIU e QIN, 2021). Quanto às alterações bioquímicas e moleculares, citam-se as vias que envolvem hormônios, como o ácido abscísico e antocianina, as vias de Ca²⁺, a geração de espécies reativas de oxigênio (ROS) (H₂O₂) o que leva ao aumento ou diminuição de vias para biossíntese e degradação de proteínas (CHEN et al., 2019; KAUR et al., 2021; LIU e QIN, 2021; SELEIMAN et al., 2021). Nesse cenário, o melhoramento de milho-pipoca, além de estimar as características agrônômicas, como RG e CE, também pode avaliar características morfofisiológicas e bioquímicas, na

expectativa de que estas possam contribuir como ferramentas para a seleção indireta de RG e, ou CE (KAMPHORST et al., 2019, 2020a; LIMA et al., 2019).

Nesse aspecto, na espécie *Zea mays*, tradicionalmente, os caracteres morfológicos utilizados são: menor intervalo entre os florescimentos masculino e feminino (CÂMARA et al., 2007; TEIXEIRA et al., 2010), maior prolificidade (número de espigas por planta) (CÂMARA et al., 2007), menor número de ramificações do pendão (CÂMARA et al., 2007; LEITE et al., 2021), bem como senescência retardada das folhas e do colmo (*stay-green*) (CÂMARA et al., 2007; COSTA et al., 2008).

Os genótipos *stay green*, os quais apresentam uma senescência retardada em relação à média dos genótipos-padrão, caracterizam-se como aqueles mais produtivos e considerados adaptados à condição de seca (BOLAÑOS et al., 1993; TOLLENAAR et al., 2004; JOSHI et al., 2006; COSTA et al., 2008; ARAUS et al., 2010; CAIRNS et al., 2012; ADEBAYO et al., 2014). No período pós-florescimento, a senescência foliar tardia contribui para o melhor enchimento dos grãos, devido ao maior envio de fotoassimilados aos grãos no final do estágio de enchimento (ZAIDI et al., 2004).

Métodos que usam as propriedades espectrais das folhas (*spectral vegetation indices*) vêm sendo utilizados para avaliar a senescência foliar, tanto em folha – por meio de *portable chlorophyll meter index* (SPAD) – quanto em dossel, por meio de equipamentos que quantificam o valor do *normalized difference vegetation index* (NDVI) (ARAUS et al., 2012). Todavia, a aplicação eficaz das metodologias de fenotipagem reside, em parte, na capacidade de aplicá-las nos estádios críticos, associados com a produção de grãos (CAIRNS et al., 2012; ADEBAYO et al., 2014).

Uma das metodologias que vem sendo utilizada nos programas de melhoramento para seleção de genótipos superiores é a espectroscopia do infravermelho (MEES et al., 2018; CATTANEO et al., 2019; FERREIRA DE OLIVEIRA et al., 2020; JIANG et al., 2020), que abrange os comprimentos de onda de 780 a 1.000.000 nm, sendo subdividido em três regiões: infravermelho próximo – NIR (780 – 2.500 nm), infravermelho médio – MIR (2.500 a 5.000 nm) e o infravermelho distante – FAR (5.000– 100.000 nm) (SKOG et al., 2009). A utilização dos espectros de infravermelho próximo (NIR) e de metodologias baseadas no movimento vibracional molecular têm-se apresentado bastante promissores nos programas de melhoramento, como por exemplo na identificação de estresse biótico e abiótico (CATTANEO et al., 2019). Essa identificação se dá principalmente pela capacidade preditiva das ligações C-H, O-H, N-H e C=O, sendo predominantes em água e compostos orgânicos, como carboidratos, óleos, álcoois, ácidos nucleicos e compostos fenólicos. Dessa forma, a quantificação desses compostos no material de estudo deve respeitar a lei de Lambert-Beer-Bouguer, na qual a quantidade de luz absorvida ou refratada é

proporcional à concentração de compostos, apresentando-se como uma ferramenta não-destrutiva fundamental para a análise dos compostos *in vivo* (ESTEVE et al., 2012; MISHRA et al., 2020).

A utilização de métodos não destrutivos para a avaliação e a seleção de características agronômicas, como a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), é uma opção de elevado potencial para ser utilizada em programas de melhoramento (JIANG et al., 2020). Tal técnica está associada à discriminação de genótipos de forma precoce, permitindo ou não o desenvolvimento da planta e a formação de sementes, o que pode levar ao avanço das populações, proporcionando a seleção de linhagens superiores para a obtenção de híbridos comerciais com características agronômicas de interesse (JIANG et al., 2020).

Diante do exposto, algumas questões importantes foram tragas à baila, como: em milho-pipoca pode ser possível identificar a variabilidade genética dos caracteres agronômicos (RG, CE e VP) em co-associações com estimativas de espectros do NIR para a seleção indireta? Ainda: o NIR possui aptidão para discriminar condições hídricas contrastantes no solo? Esta última arguição advém do fato de que se acredita que plantas submetidas ao déficit hídrico no solo (WS) apresentem diferenças na composição química em relação à condição bem irrigada (WW), visto que durante todo o ciclo existem sucessivas alterações morfofisiológicas. E, por fim: seria possível identificar o momento em que ocorre a antese masculina das plantas por meio dos espectros do NIR?

Na tentativa de responder essas questões foram utilizadas treze linhagens S₇ com estimativa de CE superior a 25 mL g⁻¹ (LEITE et al., 2022) para serem avaliadas em campo em relação a duas condições hídricas distintas e, assim, investigar o impacto do estresse hídrico sobre caracteres agronômicos, bem como utilizar a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) como perspectiva para a seleção indireta de genótipos mais produtivos em condição de seca.

2- OBJETIVOS

2.1 – Objetivos gerais

- I- Inferir sobre as respostas diferenciais de características morfoagronômicas, decorrentes do estresse hídrico aplicado a treze linhagens de milho-pipoca pré-selecionadas do Banco de Germoplasma da UENF em comparação com condição bem irrigada; e
- II- Determinar o espectro de infravermelho próximo (NIR) ao longo do ciclo da cultura, nas diferentes condições hídricas.

2.2 – Objetivos específicos

- a) Avaliar as correlações entre as características agronômicas e o espectro de NIR;
- b) Classificar as linhagens com base nas condições hídricas aplicadas via espectroscopia NIR;
- c) Identificar os estádios fenológicos com base nos índices espectrais; e
- d) Correlacionar a condição hídrica e o estágio fenológico da planta simultaneamente.

3- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Aspectos gerais do milho-pipoca e sua importância econômica

O milho-pipoca é um tipo especial de milho, caracterizado por ter grãos pequenos, duros, com capacidade de estourar quando submetidos a temperatura em torno de 180 °C (SAWAZAKI, 2001; AMARAL JUNIOR et al., 2013). O que o diferencia do milho comum é que apenas alguns grãos estouram enquanto no milho-pipoca a maioria estoura. Isso mostra que por meio de seleção massal realizada ao longo dos séculos de cultivo desta cultura, houve diferenciação do milho-pipoca em relação ao milho comum, para um grão menor, com maior concentração de amido no endosperma e pericarpo mais resistente, suportando, assim, a alta pressão (SAWAZAKI, 2001; AMARAL JUNIOR et al., 2013). Além dessa característica, a cultura de milho-pipoca apresenta outras peculiaridades, como menor tamanho de planta, de pendão e dos grãos, e maior susceptibilidade a pragas e doenças.

A capacidade de expansão (CE) consiste em um índice que relaciona o volume de pipoca estourada com a massa de grãos utilizada, sendo expressa em mL g⁻¹. O Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA) considera como valor mínimo 30 mL g⁻¹ de estimativa de CE para a comercialização de milho-pipoca. Entre as características que reduzem a CE, destacam-se a quantidade e a distribuição do amido farináceo no endosperma, o tamanho e o formato dos grãos e o tamanho da ponta do grão (SAWAZAKI, 2001). Alguns fatores, como a umidade presente nos grãos e o tipo de secagem, assim como danos sofridos no pericarpo e no endosperma podem interferir de forma a comprometer essa propriedade do milho-pipoca (PENA et al., 2022). Outra característica que apresenta grande importância para a cultura do milho-pipoca é o rendimento de grãos (RG), que apresenta maior interesse para os

produtores. Esta é afetada por três componentes principais, sendo eles: número de espigas por planta, número de grãos por espiga e massa de 100 grãos (BORTOLINI et al., 2001).

Os produtores apresentam interesse no milho-pipoca devido ao seu elevado valor agregado, quando comparado ao milho comum (FREITAS JÚNIOR et al., 2009; AMARAL JUNIOR et al., 2013). Além disso, trata-se de um alimento com altas propriedades nutricionais, contendo principalmente antioxidantes, fibras, vitaminas, proteínas, açúcares e gorduras (STEVE et al., 2013). A pipoca pode ser consumida *in natura* e também na forma industrializada, estando diretamente relacionada a momentos recreativos (AMARAL JUNIOR et al., 2013; LIMA et al., 2016).

O milho-pipoca vem se destacando no agronegócio brasileiro devido a busca pela diversificação de culturas na segunda safra, a fim de aproveitar melhor esse período (BERTOLUCCI, 2022). Ratifica-se aqui que um dos principais incentivos para se investir no milho-pipoca está intimamente relacionado ao seu alto valor agregado, que pode superar em três vezes o valor do milho comum. Segundo informações da Secretaria de Agricultura, Pecuária, Irrigação, Pesca e Aquicultura (SEAGRI) da Bahia, a partir de publicações no CEASA de Belo Horizonte, Minas Gerais, em 2021 a saca de 60 Kg do milho comum foi cotada a R\$ 69,50, enquanto os produtores de milho-pipoca receberam R\$ 265,00 pela saca de mesma quantidade (BRASIL, 2022). Em território nacional, a produção de milho-pipoca atingiu cerca de 260 mil toneladas, das quais 220 mil foram consumidas internamente, movimentando um mercado de US\$ 628 milhões. Vale ressaltar que no estado do Mato Grosso o plantio do milho-pipoca é realizado no período de seca na região Centro-Oeste do país, reforçando ainda mais a necessidade de seleção de genótipos eficientes e, ou tolerantes ao déficit hídrico no solo.

3.2 – O impacto do déficit hídrico na cultura do milho-pipoca

O déficit hídrico no solo é considerado uma condição de estresse abiótico grave, que restringe em grande escala a produção da agricultura mundial. A condição de restrição hídrica acontece quando a disponibilidade de água no solo diminui ou ocorre a má distribuição de chuva ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas agrícolas (MIR et al., 2012). Essa condição vem se agravando com as mudanças climáticas globais previstas, sendo um entrave na produção de diversas culturas, podendo acarretar grandes perdas na produtividade (MIR et al., 2012; ZIA et al., 2013; ADEBAYO et al., 2014; NASHIRIM et al., 2020; ZAHIR et al., 2022).

Na cultura do milho, o déficit hídrico no solo reduz drasticamente o rendimento

de grãos (RG), podendo até mesmo inviabilizar a produção em lavouras atingidas em fases iniciais por seca de forte intensidade e duração (CAIRNS et al., 2012). Em estudo dirigido por Cairns et al. (2012), a deficiência hídrica no solo diminuiu significativamente o rendimento de grãos em linhagens (80%) e híbridos (76%) de milho comum. A perda de rendimento e seus componentes, para ambos os tipos de genótipos avaliados, foi associada em grande parte à diminuição do número de grãos produzidos por unidade de área (CAIRNS et al., 2012).

RG é uma característica agrônômica complexa, dependente de diversos fatores, incluindo o crescimento vigoroso, a disponibilidade de água e de nutrientes em quantidades adequadas, bem como de radiação solar, sendo, pois, uma característica quantitativa, de difícil mensuração (HALLAUER et al., 2010). Para Cairns et al. (2012) a aplicação eficaz das metodologias de fenotipagem reside, em parte, na capacidade de aplicá-las nos estádios críticos, associados com a produção de grãos. Nesse sentido, elucidar os processos-chave do desenvolvimento em etapas cruciais para a produção de grãos em condições de déficit hídrico, fornecerá orientações importantes sobre as características mais adequadas para a seleção, bem como, permitirá determinar os estádios fenológicos apropriados para a quantificação dessas características. Além disso, quando a limitação ocorre na fase de enchimento de grãos, também se constata a redução na capacidade de expansão (CE) (LIMA et al., 2019; KAMPHORST et al., 2020a).

A CE é uma característica agrônômica com propriedades aditivas, ou seja, o ambiente é menos impactada na expressão da expansão; além disso, são características inversamente correlacionadas, o que requer acuidade na utilização de ferramentas biométricas – como a seleção simultânea –, bem como de programas de melhoramento que privilegiem ganhos para a aditividade e dominância (PEREIRA e AMARAL JUNIOR, 2001; POSSATO JÚNIOR et al., 2021). A capacidade de expansão é uma característica primordial na seleção de genótipos superiores, uma vez que para que se registre uma nova cultivar no MAPA, é necessário que esta apresente estimativa de CE superior a 30 mL g⁻¹. Isso torna os estudos dos efeitos do déficit hídrico ainda mais fundamentais, pois trata-se de uma característica fortemente afetada pela redução da água no solo (KAMPHORST et al., 2018a, 2018a; LEITE et al., 2022)

Em decorrência dos eventos de déficit hídrico no solo, prejuízos têm sido cada vez mais frequentes, estando eles relacionados à intensidade, à duração do período de escassez hídrica e ao estágio fenológico da planta (AWANGE et al., 2016; VAN LOON et al., 2016). Para os casos mais graves, o déficit hídrico no solo coincide com os estádios de florescimento e de enchimentos de grãos, o que provoca redução em

RG (TEIXEIRA et al., 2010). Esse fenômeno está relacionado com alterações fisiológicas, moleculares e bioquímicas que acometem plantas submetidas ao déficit hídrico (TARDIEU et al., 2011; FAROOQ et al., 2014; ALI et al., 2017; PIPATSITEE et al., 2022). Entre as modificações desencadeadas por fatores fisiológicos, destaca-se o aumento da síntese de ácido abscísico (ABA), devido à diminuição da enzima nitrato redutase nas raízes e nas folhas, culminando no fechamento estomático, na redução do crescimento foliar e na aceleração da senescência (TAIZ et al., 2017).

Sabendo-se de tais impactos, técnicas de fenotipagem em grande escala e em condições de campo, têm sido buscadas serem utilizadas para a investigação das consequências da redução da água no solo nas plantas (CAIRNS et al., 2012; ARAUS et al., 2018; KAMPHOST et al., 2018), principalmente por meio do uso de técnicas não-destrutivas (JIANG et al., 2020).

3.3 – Características utilizadas para a identificação de genótipos superiores em condição de déficit hídrico no solo

Embora RG seja a característica-alvo usada para avaliar o grau de tolerância ao déficit hídrico no solo em plantas submetidas ao estresse hídrico, a seleção direta via RG tem sido considerada pouco eficiente, pois a herdabilidade desse caráter é reduzida, devido à elevada influência do ambiente (BOLAÑOS; EDMEADES, 1993; SANTOS et al., 2003a; CÂMARA et al., 2007). Em relação ao milho-pipoca, uma atenção especial é requerida, pois não basta a superiorização de RG, mas também a da CE, por serem as características de maior importância para a valorização do produto final e, portanto, há que se buscar ganhos simultâneos (DAROS et al., 2004; KAMPHORST et al., 2019, 2020a; LIMA et al., 2019). Sendo assim, características fortemente correlacionadas a RG, que apresentam maior herdabilidade e que sejam mais fáceis de mensuração constituem uma boa opção para auxiliar na seleção de indivíduos superiores (MONNEVEUX et al., 2008; LIU et al., 2021).

Consideram-se como principais caracteres agrônômicos secundários e associados a RG o menor intervalo entre o florescimento masculino e o feminino (SANTOS et al., 2003b; CÂMARA et al., 2007; TEIXEIRA et al., 2010), a senescência retardada das folhas e colmo (*stay-green*) (ZAIDI et al., 2004; CÂMARA et al., 2007; COSTA et al., 2008), a maior prolificidade (LI et al., 2003; CÂMARA et al., 2007), bem como o menor número de ramificações do pendão (DURÃES et al., 2004; CÂMARA et al., 2007). Com reconhecida atuação no mecanismo de tolerância ao déficit hídrico no solo, citam-se ainda o menor enrolamento foliar – relacionado à manutenção da pressão de turgor – e o maior ângulo de inclinação da folha em relação à superfície do

solo, o que implica em menor interceptação da radiação solar no horário de maior temperatura do dia (DURÃES et al., 2004; LIU e QIN, 2021). Especificamente em milho-pipoca e em condição de déficit hídrico no solo, a característica número de grãos por fileira mostrou-se importante para identificar genótipos mais produtivos e com maior CE (KAMPHORST et al., 2020a).

No período pós-florescimento, a senescência foliar tardia contribui para o melhor enchimento dos grãos, devido ao maior envio de fotoassimilados aos grãos no final do estágio de enchimento (ZAIDI et al., 2004). Os métodos que usam as propriedades espectrais das folhas vêm sendo utilizados para avaliar a senescência foliar (ARAUS et al., 2012). A análise dos espectros de NIR tem se mostrado uma opção potencial para a identificação da senescência de diversas culturas, bem como para a quantificação de sólidos solúveis (MEES et al., 2018; MISHRA et al., 2020; VILLESSECHE et al., 2022).

3.4 – Propriedades espectrais e o uso da espectroscopia em fitotecnia e melhoramento de plantas

A espectroscopia pode ser definida como o estudo entre a interação da matéria com a radiação eletromagnética, compreendendo as ondas de rádio, micro-ondas, raios infravermelhos, luz visível, raios ultravioletas, raios X e raios gama. Os raios infravermelhos não são visíveis ao olho humano, são obtidos por equipamentos que utilizam interações por absorção, fluorescência ou espalhamento e permitem a identificação de ligações químicas (PUTZIG et al., 1994).

O NIR compreende uma faixa do espectro do infravermelho-próximo, variando de 780 a 2.500 nm, que é amplamente utilizada para determinar a qualidade de produtos agrícolas, por ser utilizada de forma não destrutiva na mensuração dos componentes químicos presentes em amostras (JAMSHIDI et al., 2012; SCHAARE et al., 2000). Programas de melhoramento têm utilizado a análise NIR como ferramenta para a triagem rápida de algumas das principais características da madeira (YEH et al., 2005). Na indústria açucareira, esse método vem sendo utilizados para a identificação do conteúdo de °BRIX na seleção de variedades de cana-de-açúcar com maior teor de açúcar e maior quantidade de fibras (SANSECHAN et al., 2018; PHUPHAPHUD et al., 2020). Dessa forma, as utilizações dos espectros de infravermelho têm-se mostrado promissores como técnicas não destrutivas para a identificação de compostos orgânicos e água (ESTEVE AGELET et al., 2012; MISHRA et al., 2020). De maneira geral, estes estudos visam correlacionar espectros à

quantificação de moléculas orgânicas, como por exemplo, o teor de óleos, carboidratos, proteínas e matéria seca, para auxiliar na efetiva seleção de plantas mais produtivas e de moléculas inorgânicas como a água (JIANG, 2020; MISHRA et al., 2020).

Diante do exposto, a utilização do espectro de NIR pode atender a demanda do melhoramento vegetal na identificação de plantas sob condições limitantes de água (CATTANEO et al., 2019; JIANG et al., 2020; MISHRA et al., 2021). Além disso, tal técnica pode auxiliar na identificação dos estádios fenológicos em relação à antese masculina das plantas de milho-pipoca e correlacionar os espectros com os caracteres agronômicos principais, como rendimento de grãos, capacidade de expansão e volume de pipoca expandida por hectare.

4- REVISÃO EM BANCOS DE PROPRIEDADE INTELECTUAL

Com o avanço dos estudos relacionados ao melhoramento genético vegetal, as autoridades brasileiras competentes, presentes no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), implantaram um sistema de legislação denominado Registro Nacional de Cultivares (RNC), instaurado por meio da Portaria nº 527, mediante a necessidade de disponibilizar rapidamente para os agricultores os mais recentes avanços da pesquisa genética vegetal. O RNC fiscaliza, analisa e registra as cultivares dos setores públicos e privados, regida pela Lei de Sementes nº 10.711/03, que habilita a comercialização de sementes e mudas em todo território nacional.

Com o intuito de averiguar as cultivares registradas da espécie em estudo, foi realizada em outubro do corrente ano, uma varredura no sítio eletrônico do MAPA/RNC, utilizando como parâmetros de busca o nome científico "*Zea mays* L. var. *everta* (Sturtev.) L. H. Bailey" e o nome comum da cultivar "milho-pipoca". Por meio desta pesquisa, constatou-se a ocorrência de 163 registros.

A maioria das cultivares de milho-pipoca registradas até o momento advém de empresas privadas, como a Pipolino Indústria Comércio LTDA, com 20 registros (ME 453, SH3111, SH4020, SH4044, SH4862, SH612M, VWP211, VYP 211, VYP 212, VYP 213, VYP 220, VYP 313, VYP 314, VYP 315, VYP 316, VYP 317, VYP 321, VYP 330, VYP 410, e VYP 420); a Yoki Alimentos S/A, com 19 registros (AP 22217 HT, AP 2501, AP 2503, AP 2504, AP 4501, AP 4502, AP 4503, AP 4505, AP 6001, AP 6002, AP 8201, AP 8202, AP 8203, P 226 HT, P 622, P 625, P 628, P 630, e P 802); a General Mills Brasil Alimentos LTDA, com 13 registros (AP2204, AP4001, AP4507, AP4509, AP4512, AP4514W, AP6004, AP6005, AP6008, AP8204, AP8205 R400MR, e XAP4511); a Agristar do Brasil LTDA, com 13 registros (BAS 5802, BAS 5803, BAS 600, BAS 6101, BAS 6102, BAS 6103, BAS 8282, M Pop 120, M Pop 162, Pipoca Americano RS20, TROP 7010, TROP 7772, e TROP 8112); a Comercial Cianorte LTDA, com seis registros (MMF 100, MMF 200, MMF 300, W 2021, W 2022, e W 2006); a Felipe Bresolin LTDA, com treze registros (AP8208, AP8101, AG9432, 2705A, AP8206, AP8207, 3201A, AG8619, AG05960, AP6011, AP6012, AG13993, e 2107A); a SG Nutri Sementes, Grãos e Nutrientes Comércio e Serviço LTDA, com quatro registros (QUIMARPOP 161, QUIMARPOP 164, QUIMARPOP 105, e QUIMARPOP 176), a Lódea Consultoria e Comércio de Sementes LTDA ME, com também quatro registros (N 1241 T, N 15 262, N 34 1262, e N 54830); a Sementes Boa Esperança LTDA, ainda com quatro registros (SBEP 1, SBEP 312, SBEP 3, e SBEP 4); a Basso Comércio de Sementes, Importação, Exportação LTDA, com três registros (BP 2031,

BP 262, e BP 3002), assim como a Seedco do Brasil Agricultura LTDA (POP TOP; SD MAX, e POP TOP II); o Departamento de Sementes, Mudas e Matrizes DSMM/CATI, com dois registros (Catipoca Amarela e Catipoca Branca); a Atlântica Logística e Armazenagem LTDA-ME, com também dois registros (Conquistador e PAVO REAL); bem com a Feltrin Sementes LTDA (Estalo e Pipoca Americano); e, por fim, com apenas um registro a empresa Marcelo Ananias (W 1016), a Elemar Reinoldo Haas (ZT 23), a ATS Agricultura, Tecnologia e Serviços LTDA (POP TEN), e a TSV Sementes de vegetais LTDA (TSV 1776).

Foram identificados apenas dois Centros Públicos de Pesquisa no Brasil que possuem cultivares registradas no MAPA, a saber: o IAC (Instituto Agrônomo de Campinas), que possui 13 registros (IAC 112, IAC 12, IAC 125, IAC 138 1 2 3, IAC 138 8 30, IAC 14 2 3 1, IAC 268; IAC 367, IAC 8383, IAC 9614, IAC 98, IAC HS SAM, e IAC Pipoca Sam); e a UENF (Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro), com 23 registros (UENF 14, UENF DIVIBRIDO, UENF Explosão, UENF HS 01, UENF HS 02, UENF HS 03, UENF HS 04, UENF HS 05, UENF N 01, UENF N 02, UENF N 03, UENF P 01, UENF P 02, UENF P 03, UENF SSR 01, UENF SSR 02, UENF SSR 03, UENF SSR 04, UENF SSR 05, UENF SSR 06, UENF UEM 01, UENF UVV 01, e UENF WS01).

O RNC possui apenas um registro de cultivar de milho-pipoca com tolerância ao déficit hídrico no solo (UENF WS01), o que foi realizado pela UENF. Isto torna ainda mais importantes estudos que visem à obtenção de cultivares de milho-pipoca adaptadas à limitação hídrica e que possam ser utilizadas para a prática de uma agricultura mais sustentável quanto ao uso da água.

5- MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 - Genótipos

Treze linhagens S₇ de milho-pipoca, pertencentes ao Banco Ativo de Germoplasma (BAG) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), foram pré-selecionadas (Tabela 1) a partir de um painel de 50 linhagens, as quais foram avaliadas em condição de déficit hídrico no solo e expressaram estimativas de CE superiores a 25 mL g⁻¹ (LEITE et al., 2022).

Tabela 1 – Descrição das linhagens de milho-pipoca e informações quanto à genealogia, procedência, adaptação climática e ciclo.

Genótipo	Genealogia	Procedência	Adaptação Climática
L217	IAC 125	IAC	Tropical
L220	IAC 126	IAC	Tropical
L221	IAC 125	IAC	Tropical
L222	IAC 125	IAC	Tropical
L292	URUG 298	CIMMYT	Temperada
L328	UFV M-2 Barão de Viçosa	UFV	Tropical
L332	UFV M-2 Barão de Viçosa	UFV	Tropical
L480	SE 013	UEM	Tropical
L507	PA 170 Roxo	CIMMYT	Temperada
L510	S ₇	PA 170 Roxo	Temperada
L684	S ₇	UENF 14	Tropical
L688	S ₇	UENF 14	Tropical
L691	UENF 14	UENF 14	Tropical

IAC – Instituto Agrônomo de Campinas; CIMMYT – Centro Internacional de Melhoramento de Milho e Trigo; UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; UFV – Universidade Federal de Viçosa. As classificações quanto ao ciclo foram obtidas em experimentos realizados em safras anteriores pelo Laboratório de Melhoramento Genético Vegetal (LMGV) da UENF.

5.2- Desenho experimental e tratos culturais

O experimento foi realizado no Colégio Estadual Agrícola Antônio Sarlo, em Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro (RJ), no ano de 2021, em período de baixa precipitação pluviométrica, que corresponderam aos meses de abril a agosto

(outono/inverno). O local dispõe de uma estação meteorológica automática pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que permite um acompanhamento climático detalhado. As informações sobre estimativas de médias de temperatura, de umidade relativa do ar e de radiação solar máxima encontram-se na Figura 1.

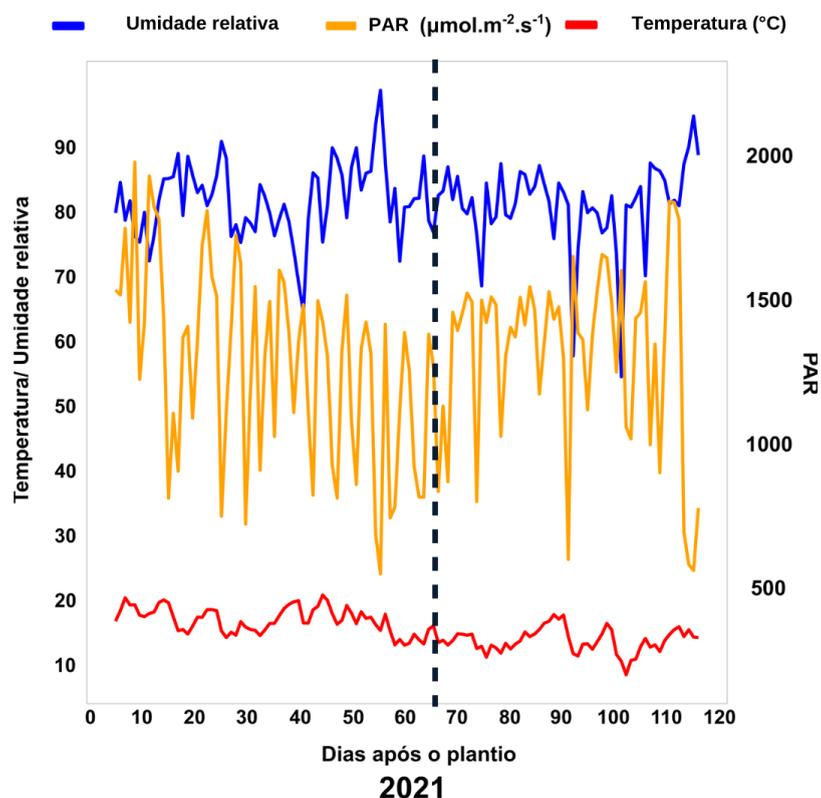


Figura 1 – Condições ambientais (umidade relativa, radiação fotossinteticamente ativa e temperatura média) observadas durante o cultivo do milho-pipoca em 2021, com linha pontilhada demarcando o florescimento masculino.

O delineamento experimental utilizado foi blocos inteiramente casualizados com três repetições, em duas condições hídricas (CH) contrastantes, a saber, bem irrigada (WW, do inglês *well-watered*) e com déficit hídrico (WS, do inglês *water-stressed*). A condição WW recebeu irrigação para manutenção da capacidade de campo (-10 MPa), a qual foi monitorada por meio de tensiômetros Decagon MPS-6 (Decagon, USA). Por outro lado, na condição WS houve a suspensão da irrigação em WS no estágio fenológico de pré-antese masculina, que ocorreu no 26º dia (\cong 68 DAS) e no 23º dia (\cong 67 DAS), respectivamente, nos ambientes WS e WW. Independente da CH, a irrigação ocorreu por meio da instalação de um gotejador por planta, do tipo katif, com vazão aproximada de 2,30 mm h⁻¹. Durante o período de condução dos experimentos, o potencial hídrico do solo foi monitorado por tensiômetros Decagon

MPS-6. O ambiente WS possuía três pontos de coleta de dados, enquanto o ambiente WW, um ponto de coleta. Os tensiômetros foram instalados entre plantas, em profundidade de 0,20 m. O solo do ambiente WW foi mantido em capacidade de campo (-0,01 MPa) durante todo ciclo da cultura, ao passo que no ambiente WS o solo atingiu o ponto de murcha permanente (-1,5 MPa) aos 42 dias após o florescimento masculino (estádio de enchimento de grãos) (Figura 2).

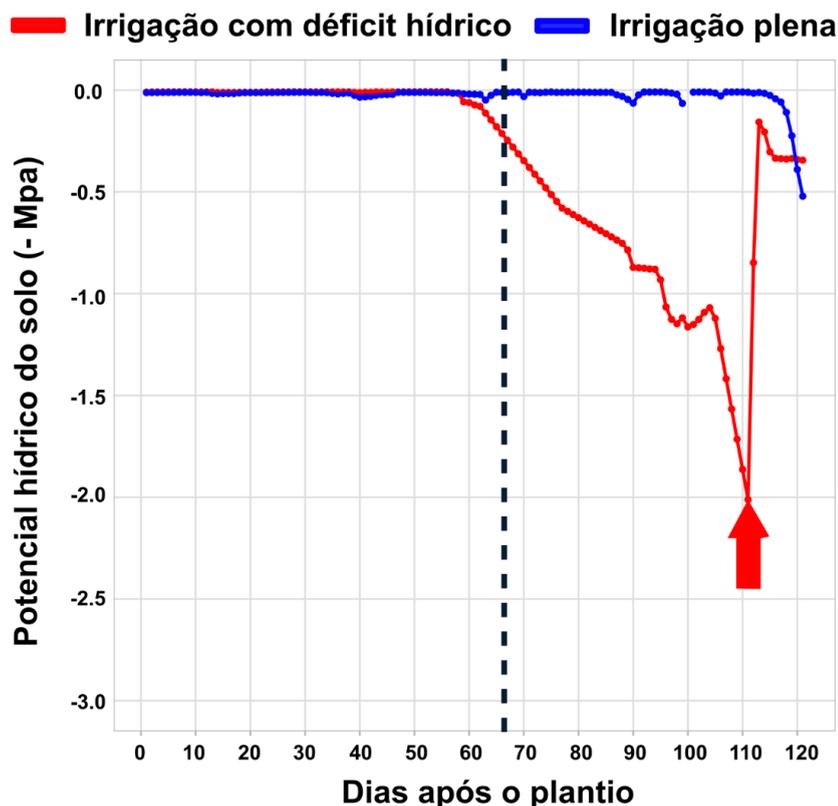


Figura 2 – Potencial hídrico do solo durante o cultivo de milho-pipoca em condições hídricas contrastantes (WS e WW), linha pontilhada demarca o florescimento masculino.

A área experimental foi parcialmente gradeada e sulcada, em que cada parcela foi constituída por uma linha de 4,40 m, espaçada em 0,20 m entre plantas e 0,80 m entre linhas, totalizando 23 plantas por linha. Os genótipos foram semeados com três sementes por cova, juntamente com a adubação de base dos experimentos, sendo esta realizada com 30 Kg ha⁻¹ de N (na forma de uréia), 60 Kg ha⁻¹ de P₂O₅ (superfosfato triplo) e 60 Kg ha⁻¹ de K₂O (cloreto de potássio). A adubação de cobertura ocorreu aos 30 dias após semeadura, e disponibilizando-se 100 Kg ha⁻¹ de N (na forma de uréia).

Na condição WW o experimento recebeu doses de irrigação semanais durante todo o ciclo da cultura, favorecendo o seu desenvolvimento. Já na condição de WS, com o intuito de garantir o estresse hídrico, a irrigação foi suspensa 15 dias antes do

florescimento masculino, perdurando até a fase de enchimento de grãos. O florescimento médio masculino ocorreu no dia 26 (\cong 68 DAS) e 23 (\cong 67 DAS), no ambiente WS e WW, respectivamente. A data da antese masculina foi determinada com base em experimentos anteriores realizados com milho-pipoca em condição de déficit hídrico no solo (KAMPHORST et al., 2020a; SANTOS et al., 2021). A irrigação foi aplicada nos diferentes regimes hídricos, utilizando um sistema de gotejamento (vazão de 2,30 mm h⁻¹). Um gotejador katif por planta foi instalado, com espaçamento de 0,20 m entre plantas e 0,80 m entre linhas. A Tabela 2 contém as especificações da irrigação aplicada (em mm) durante todo o período de cultivo, tanto no regime irrigado (WW) quanto na área com estresse hídrico (WS), apresentadas em dias após a semeadura (DAS). Na área considerada WS, a irrigação foi suspensa a partir dos 49 DAS até a colheita. Contudo, aos 54, 66, 79, 93, 107 e 120 DAS houve precipitação pluviométrica, totalizando 170,20 mm (Tabela 2). Os eventos de chuva foram registrados na estação climatológica localizada próxima ao experimento e a quantidade total de água aplicada nos genótipos de maturação foi de 78,90 mm para o ambiente WS, enquanto as plantas do ambiente WW receberam uma quantidade total de 132,93 mm.

Tabela 2 – Precipitação e irrigação (mm) aplicada nos genótipos precoces e tardios na condição WW e WS, considerando-se os dias após a semeadura (DAS).

Dias após a semeadura	Precipitação (mm)	Quantidade de água (mm)			
		Ambiente Irrigado (WW)		Ambiente com Limitação hídrica (WS)	
		Aplicado	Total	Aplicado	Total
1	0,20	11,10	11,30	12,10	12,26
8	11,00	15,00	26,00	16,00	27,03
19	20,60	16,40	37,00	17,40	38,00
31	9,00	17,10	26,10	18,10	27,13
43	0,00	14,70	14,70	15,30	15,30
54	44,80	5,30	50,10	-	100,20
66	66,60	3,30	69,90	-	66,60
79	1,20	17,80	19,00	-	1,20
93	2,40	15,00	17,40	-	2,40
107	2,00	17,20	19,20	-	2,00
120	12,40	0,00	12,40	-	-
Total	170,20	132,90	303,10	78,90	236,72

5.3 - Caracteres agronômicos

A colheita foi realizada na maturidade fisiológica dos grãos, ou seja, em momento no qual as sementes apresentam umidade em torno de 30% e com a presença da camada negra no pedicelo (MÁRCIA et al., 2003). Apartir de então, foram avaliadas as seguintes características: rendimento de grãos (RG), capacidade de expansão (CE) e volume de pipoca expandida por hectare (VP). Tais características foram mensuradas com base em todas as plantas de área útil da parcela. RG foi obtido em gramas por parcela, corrigido para 13% de umidade e expresso em Kg ha⁻¹. A CE foi obtida por meio da massa de 30 g de grãos, expandida em micro-ondas, em saco de papel especial para pipocamento, na potência de 1.000 W, por um período de tempo de 1min e 45s, nas três repetições de cada genótipo. O volume de pipoca expandido foi quantificado em proveta graduada em mL e a CE foi determinada pelo quociente do volume obtido de pipoca pela massa do grão (30 g), sendo expressa em mL g⁻¹. O VP foi obtido pela multiplicação de RG por CE e expresso em m³ ha⁻¹.

5.4 – Análises estatísticas

As análises de variância individuais foram realizadas para cada condição hídrica (WW e WS) e a análise conjunta dos experimentos foi realizada para estimar a significância do efeito da interação entre genótipos *versus* cada CH. Na análise de variância individual utilizou-se o seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ij} = \mu + G_i + B_j + \varepsilon_{ij},$$

em que:

Y_{ij} é a observação do i-ésimo genótipo, do j-ésimo bloco;

μ é a constante geral;

G_i é o efeito de i-ésimo tratamento;

B_j é o efeito do j-ésimo bloco; e

ε_{ij} é o erro experimental.

Na análise de variância conjunta utilizou-se o seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + B/A_{jk} + A_j + GA_{ij} + \varepsilon_{ijk},$$

em que:

Y_{ijk} é a observação do i-ésimo genótipo no j-ésimo CH no k-ésimo bloco;

μ é a constante geral;

G_i é o efeito aleatório do i-ésimo genótipo;

B/A_{jk} é o efeito do k-ésimo bloco dentro da CH j;

A_j é o efeito fixo do j-ésimo ambiente com NID;

GA_{ij} é o efeito aleatório da interação entre o i -ésimo genótipo com o j -ésimo CH;

e

ε_{ijk} é o erro aleatório experimental médio associado à observação Y_{ijk} , com NID $(0, \sigma^2)$.

Quando diagnosticadas diferenças estatísticas para a fonte de variação genótipo, as médias foram agrupadas pelo teste Scott-Knott no nível de 5% de probabilidade, com o uso do software Rstudio e os gráficos foram gerados utilizando-se o pacote ggplot2 (WICKHAM, 2016).

5.5- Espectro de NIR

5.5.1 – Aquisição das amostras biológicas

Oriundos de duas CHs distintas, os colmos das plantas de milho-pipoca de cada parcela foram seccionados em duas posições, armazenados em caixa de isopor com gelo e levados para o laboratório para a realização das leituras do espectro do NIR. Estas foram realizadas em duas posições, uma próxima ao solo e outra à espiga principal, em cinco momentos distintos em relação à antese masculina (AM), a saber: antes desse evento, referindo-se a valores negativos (-19 e -6); e na antese masculina, referenciado como o “marco-0”, e após a antese, com referência a valores positivos (3, 11 e 23). Considerou-se um total de dez amostras biológicas, mensuradas em treze genótipos, incluindo repetições das diferentes posições, em duas CHs diferentes (WW e WS), e em cinco distintas datas de mensuração.

As amostras biológicas foram denominadas de WW -19 e WS -19, que correspondem à detecção do espectro dos colmos em 19 dias antes AM, em condição WW e WS, respectivamente; WW -6 e WS -6, que correspondem à detecção do espectro dos colmos seis dias antes da AM em condição WW e WS, nessa ordem; WW 3 e WS 3, que correspondem à detecção do espectro dos colmos aos três dias após a AM em condições WW e WS, respectivamente; WW 11 e WS 11, que correspondem à detecção do espectro dos colmos aos 11 dias após a AM em condições WW e WS, respectivamente; e WW 23 e WS 23, que correspondem à detecção do espectro dos colmos aos 23 dias após a AM em condições de WW e WS, respectivamente.

5.5.2 – Detecção dos espectros de infravermelho próximo (NIR)

Para a detecção do espectro de infravermelho próximo (NIR) das amostras biológicas, realizou a leitura espectral de 908,10 a 1674,19 nm, com uma resolução de

6,14 nm, por meio do equipamento portátil MicroNIR 16OnSite-W. A obtenção dos dados foi realizada pelo *software mobile SpectralSoft*, versão 50.1 (*Bluetooth Low Energy*, BLE). Os dados foram exportados em formato csv, sendo realizado tratamento quimiométrico via Python.

5.5.3 – Pré-processamento de dados

Os dados espectrais coletados e obtidos em relação a todo ciclo de avaliações foram pré-tratados, em seguida, por meio de *standard normal variate* (SNV), suavização com 1ª derivada e, por último, SNV + 1ª derivada afim de ajustar a linha de base.

5.5.4 – Construção da curva de calibração

Os dados pré-tratados passaram por um conjunto de calibração e foram selecionados pelo algoritmo Kennard-Stone (CHAGAS et al., 2011). O conjunto de calibração selecionado conteve 70% das amostras espectrais para a construção do modelo. E 30% das amostras espectrais compuseram o conjunto de previsão e não participaram da construção do modelo, tendo sido utilizados para validação externa (BARROS et al., 2021). O número de variáveis latentes foi determinado pela validação cruzada, definindo o número ótimo de fatores como aqueles representados pelas variáveis instrumentais. Para cada amostra espectral obtida foi calculado o número ideal de variáveis latentes, representando o menor erro de validação cruzada e, conseqüentemente, a maior capacidade preditiva do modelo.

A linearidade do modelo foi avaliada pelo coeficiente de determinação para calibração (R^2c) e previsão (R^2p), por meio da expressão:

em que:

é o valor de referência;

é o valor da grandeza calculado pelo modelo; e

é a média dos valores de referência.

Além da linearidade dos dados, utilizaram-se os erros de predição e de calibração como métricas de exatidão para averiguar o desempenho do modelo. A raiz quadrada do erro de predição – *Root Mean Square Error of Prediction* (RMSEP) – e a raiz quadrada do erro médio de calibração – *Root Mean Square Error of Calibration* (RMSEC) – foram representadas pelas equações:

e

em que:

é o número de graus de liberdade referente ao conjunto de calibração; e
são os números de amostras de predição utilizadas no cálculo das grandezas
(WOLD et al., 2001).

Para avaliar os modelos de quantificação quanto à exatidão, a métrica de raiz quadrada do erro médio (RMSE) foi calculada tanto para o conjunto de calibração (RMSEC) quanto para o de previsão. A linearidade do modelo foi avaliada pelo coeficiente de determinação para calibração (R^2c) e previsão (R^2p).

5.5.5 – Aplicação do método dos mínimos quadrados parciais (PLS)

A análise estatística multivariada foi realizada em dois diferentes segmentos de dados. Primeiramente, utilizaram-se todas as leituras em conjunto para compor a construção e validação do modelo. Em um segundo momento, dividiram-se os dados em dois grandes blocos, no intento de prever as grandezas em estudo de forma mais assertiva, obtendo um modelo bem irrigado WW e outro modelo com estresse hídrico WS.

O PSL consistiu em modelar cada parâmetro separadamente utilizando o método k-fold ($k=5$), adequado para conjuntos amostrais pequenos, em que para n amostras são gerados n conjuntos, sendo que uma amostra diferente é deixada para teste e as outras são utilizadas para treinamento; então, são gerados valores preditos de teste para cada amostra e calculado o coeficiente de determinação (R^2) entre os valores preditos e de referência para estimar a correlação.

5.5.6 – Classificador via análise discriminante linear (LDA)

Os dados já processados em SNV + Derivada foram utilizados no classificador de análise discriminante linear de Fisher (LDA), cuja qual é uma técnica utilizada na estatística para aprendizado da máquina, a fim de encontrar combinações lineares das características. Os dados foram divididos em 70% das amostras espectrais destinados à construção do modelo (classe de treinamento) e 30% para avaliar a capacidade preditiva do mesmo. Para a escolha das amostras espectrais do NIR compararam-se dois sets de forma aleatória com a única restrição de que todas as três leituras estivessem no mesmo set (calibração ou predição), garantindo que o modelo não ficasse enviesado. Obteve-se também a acurácia dos dados com base nas amostras classificadas ponderada pelo número total de amostras espectrais, conforme a seguinte equação:

em que:

VP: consiste nos dados que são verdadeiros positivos;

VN: consiste nos dados que não verdadeiros negativos;

FP: consiste nos dados que são falsos positivos; e

FN: consiste nos dados que são falsos negativos.

Além da acurácia, estimou-se a sensibilidade, que consiste na capacidade da análise apresentar indivíduos que sejam verdadeiramente positivos, ou seja, capaz de identificar corretamente o espectro para cada CH. Já a especificidade consiste na capacidade de a análise identificar verdadeiros negativos, ou seja, detectar corretamente os estádios fenológicos em relação ao espectro correspondente. As equações matemáticas utilizadas foram:

em que:

VP: consiste nos dados que são verdadeiros positivos;

VN: consiste nos dados que não verdadeiros negativos;

FP: consiste nos dados que são falsos positivos; e

FN: consiste nos dados que são falsos negativos.

Além disso, foi composta uma matriz de confusão para predizer de forma exata a correlação entre os espectros, as CHs e o estágio fenológico.

6- RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 – Expressão fenotípica de linhagens de milho-pipoca nas diferentes condições hídricas

Tanto na condição WW quanto em WS verificou-se a existência de variabilidade genética entre os genótipos avaliados para os caracteres agrônômicos estudados (RG, CE e VP) (Tabela 3), comprovada estatisticamente pela significância pelo teste F ($p < 0,01$). Uma exceção foi observada; esta foi o caso de CE, em WW. A média geral de RG na condição WW foi de 1.249,88 Kg ha⁻¹ e, em WS, de 830,47 Kg ha⁻¹; isto representou uma redução de 33,56% para esta característica. Para CE, em condição WW, a média foi de 22,16 mL g⁻¹ e, em WS, de 19,94 mL g⁻¹, o que implicou em uma redução de 10,02%. A característica VP apresentou redução de 41,34%, vez que a média geral em condição WW atingiu 28,11 m³ ha⁻¹ e, em WS, 16,49 m³ ha⁻¹. Nas análises individuais por CH, os valores de CVe tiveram amplitude de 9,92% (para CE em WS) a 31,94% (para VP em WS). Na análise conjunta, independente da fonte de variação, isto é, genótipos (G), CHs, bem como da interação G*CH, os caracteres RG, CE e VP apresentaram significância estatística (Tabela 3).

Tabela 3 – Resumo da análise de variância dos ambientes avaliados, bem como da análise conjunta e médias gerais de caracteres agrônômicos de linhagens de milho-pipoca em condições bem-irrigada (WW) e de déficit hídrico (WS).

	Fonte de variação	GL	RG	CE	VP
			Quadrado Médio		
CH – WW	Genótipo	12	562.263,03**	30,26 ^{ns}	375,81**
	Repetição	2	36.662,14	6,41	65,73
	Resíduo	24	99.130,92	17,00	78,68
	CVe (%)		25,19	18,60	31,56
	Média		1.249,88	22,16	28,11
CH – WS	Genótipo	12	467.355,44**	29,21**	232,61**
	Repetição	2	4.740,69	5,10	2,48
	Resíduo	24	31.877,02	3,91	26,70
	CVe (%)		21,50	9,92	31,94
	Média		830,47	19,94	16,49
Análise conjunta	Genótipo	12	464.460,45**	25,01*	214,38**
	CH	1	3.430.230,66**	96,59*	2.632,04**
	Genótipo x CH	12	5.651.58,01**	34,46**	394,03**
	Resíduo	48	65.503,97	10,95	52,68
	CVe (%)		24,60	15,36	32,55
	Média		1.040,17	21,05	22,30

GL: grau de liberdade; RG: rendimento de grãos (Kg ha⁻¹); CE: capacidade de expansão (mL g⁻¹); VP: volume de pipoca expandida por hectare (m³ ha⁻¹); CH: condição hídrica; WS: déficit hídrico; WW: irrigação plena; CVe (%): coeficiente de variação experimental; ns: não significativo; **: significativo em 0,01% e *: significativo em 0,05%.

Observou-se que há variabilidade genética para os caracteres de maior importância econômica para a cultura do milho-pipoca, isto é RG, CE e VP, e que a suspensão da irrigação em fase de pré-antese foi suficiente para diferenciar as CHs. De fato, a suspensão da irrigação a partir da fase de pré-antese é uma prática muito adotada para a avaliação genotípica em condição de seca em milho (ARAUS et al., 2010; ROMANO et al., 2011; CAIRNS et al., 2012; ZIA et al., 2013; ADEBAYO et al., 2014; KAMPHORST et al., 2019, 2020a). Por meio dessa ação, permitem-se que as plantas expressem em tempo hábil possíveis adaptações à condição de limitação hídrica, o que pode ser dimensionado no rendimento final (ROMANO et al., 2011; CAIRNS et al., 2012). Nesse estágio fenológico, aplicar o estresse hídrico pode comprometer a viabilidade polínica, a formação do zigoto e o enchimento de grãos, os quais são processos biológicos altamente sensíveis à limitação de água no solo (ZINSELMEIER et al., 1995), o que pode reduzir RG e seus componentes.

Nessa pesquisa o caractere RG foi mais afetado pela limitação hídrica no solo. Para Kamphorst et al. (2021), que avaliaram linhagens e híbridos de milho-pipoca em condição de seca em épocas distintas, ao déficit hídrico no solo aplicado entre a pré-antese e o enchimento de grãos reduziu em menor efeito as co-variáveis de

rendimento; entretanto, o somatório desses efeitos também reduziu drasticamente a variável principal, no caso, RG. Em suas investigações, Kamphorst et al. (2021), perceberam que em uma época de cultivo a componente de rendimento mais afetada foi número de grãos por fileira, ao passo que em outra safra, foi a massa de cem grãos. Segundo os autores, esse efeito foi influenciado por ocasião em que se instalou o ponto de murcha permanente no solo, em que a redução do número de grãos por fileira se deu por estresse hídrico logo após o florescimento; e a redução na massa dos grãos, em momento próximo ao estágio R3. No presente estudo, o ponto de murcha permanente ocorreu 42 dias após o florescimento masculino, o que tende a reduzir as estimativas das características RG e CE.

A CE, quando comparada a RG e VP, foi uma característica pouco afetada pela limitação hídrica do solo. Kamphorst et al. (2020a), avaliando linhagens de milho-pipoca em duas safras, registraram reduções de 29,31% e 9,66% na comparação entre a condição WS e WW; e Lima et al. (2019), avaliando linhagens e híbridos de milho-pipoca, mostraram uma redução de 9,08%. O processo de expansão está associado à presença da umidade contida nos grânulos de amido do grão, que quando aquecidos (≈ 180 °C), exercem pressão sobre o pericarpo, cujo rompimento expõe o endosperma (SILVA et al., 1993). Neste sentido, a falta de água durante a formação do grão pode afetar as propriedades físico-químicas, interferindo na capacidade de o grão expandir.

Em decorrência do efeito significativo genótipo*condição hídrica, espera-se uma resposta diferencial das linhagens de milho-pipoca. No processo de seleção de plantas, essas interações interferem na recomendação de cultivares para ambientes específicos, bem como para os ganhos de seleção (HALLAUER et al., 2010). Uma alternativa para a obtenção de ganhos genéticos é a identificação de variáveis para serem utilizadas na seleção indireta, as quais sejam determinantes na expressão de características principais. Torna-se interessante que estas variáveis não apresentem G*CH significativa, mas que se associem de forma significativa e positiva com as características principais (KAMPHORST et al., 2019). Nesse sentido, Kamphorst et al. (2021) descreveram que em decorrência da ausência de significância para as interações G*safra, G*CH e G*safra*CH, as características número de grãos por fileira e massa de 100 grãos são de interesse para a seleção indireta em milho-pipoca, tanto em condição WW quanto em WS. De fato, os caracteres citados foram apontados como de importância em pesquisas com milho-pipoca em condições hídricas adequadas (AMARAL JUNIOR et al., 2016; LIMA et al., 2016) e em pesquisas com a cultura sob seca (KAMPHORST et al., 2019, 2020a).

6.2 – Potencial agronômico de linhagens de milho-pipoca nas condições hídricas avaliadas

As médias de RG variaram de 624,00 Kg ha⁻¹ a 2.020,17 Kg ha⁻¹ em WW, e de 265,00 Kg ha⁻¹ a 1.223,83 Kg ha⁻¹ em WS (Figura 3). Em WW o grupo de linhagens com maiores estimativas de RG foi composto por L222, L328, L332 e L507; e em WS foi constituído por L217 e L691. As linhagens que expressaram as menores estimativas de RG em WW foram L220, L292 e L691. Em WS foram L220, L292, L332, L507, L510 e L684.

As médias de CE variaram entre 18,67 mL g⁻¹ e 27,70 mL g⁻¹ em WW; e entre 16,03 a 22,67 mL g⁻¹ em WS (Figura 3). Em condição WS as linhagens L220, L510, L684 e L691 foram as que apresentaram médias superiores. As médias de VP variaram de 10,93 m³ ha⁻¹ a 46,80 m³ ha⁻¹ e de 6,10 m³ ha⁻¹ a 27,82 m³ ha⁻¹, em WW e WS, respectivamente. Em condição WW, as linhagens L221, L222, L328, L332, L507 e L691 foram aquelas que apresentaram médias superiores, e em WS, isso ocorreu para com as linhagens L217 e L691 (Tabela 4).

Tabela 4 – Médias e teste de médias de características agronômicas de linhagens de milho-pipoca avaliadas em diferentes condições hídricas.

Linhagens	Condição WW			Condição WS		
	RG	CE	VP	RG	CE	VP
L217	1.445,83 b	25,63 a	37,06 a	1.186,10 a	18,67 b	22,14 a
L220	624,00 c	24,23 a	15,12 b	546,77 d	22,67 a	12,37 b
L221	1.242,00 b	27,70 a	34,53 a	903,40 c	20,37 b	18,50 b
L222	1.628,90 a	22,43 a	36,67 a	887,53 c	17,37 b	15,33 b
L292	797,97 c	26,13 a	20,50 b	580,23 d	20,03 b	11,57 b
L328	1.863,23 a	21,30 a	40,13 a	993,80 b	16,77 b	16,73 b
L332	2.020,17 a	23,50 a	46,80 a	585,67 d	17,00 b	9,93 b
L480	1.144,67 b	20,20 a	22,80 b	997,67 b	17,73 b	19,20 b
L507	1.586,57 a	26,87 a	42,33 a	519,93 d	19,50 b	10,30 b
L510	1.186,37 b	20,60 a	26,03 b	265,00 d	23,00 a	6,10 b
L684	1.109,47 b	19,80 a	21,80 b	582,63 d	24,30 a	13,77 b
L688	1.170,13 b	18,67 a	21,87 b	742,50 c	16,03 b	11,80 b
L691	1.629,17 a	24,03 a	39,15 a	1.223,83 a	22,73 a	27,82 a

WS: déficit hídrico; WW: irrigação plena; RG: rendimento de grãos (Kg ha⁻¹); CE: capacidade de expansão (mL g⁻¹); VP: volume de pipoca expandida por hectare (m³ ha⁻¹). Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo método Scott-Knott em 5% de probabilidade.

RG e CE são as características principais para a cultura do milho-pipoca.

Estudos sobre os efeitos gênicos no controle dessas características na cultura sob condições de irrigação plena (PEREIRA e AMARAL JUNIOR, 2001; SILVA et al., 2010; COAN et al., 2019; SCHWANTES et al., 2020), ou sob estresse biótico (SCHWANTES et al., 2017; MAFRA et al., 2018; AMARAL JUNIOR et al., 2019), bem como sob deficiência nutricional (SANTOS et al., 2020) e limitação hídrica no solo (KAMPHORST et al., 2019; LEITE et al., 2022). Têm revelado a ação genética aditiva com prevacente para CE, enquanto a ação não-aditiva tem sido a mais importante na expressão de RG e seus componentes. Nesse aspecto, tendo em vista que é possível aproveitar os desvios de dominância para a característica RG, a CE se torna a característica de seleção *per se* mais importante. Por essa razão, por apresentarem as maiores médias de CE, independente da CH, as linhagens L220, L510, L684 e L691 se tornam as genitoras promissoras para serem utilizadas em programas de melhoramento em condição de seca. Apesar dessas linhagens terem sido selecionadas por apresentarem $CE \geq 25 \text{ mL g}^{-1}$, durante esse período de cultivo nenhuma linhagem apresentou CE igual ou superior a esse valor, cuja resultante pode ser interpretada pela ocorrência de significância para a interação $G \times CH$, já que por ser considerada oligogênica a CE também é influenciada pela ação do ambiente (PEREIRA e AMARAL JUNIOR, 2001; SANTOS et al., 2012).

Independente da CH, de maneira geral, pode-se destacar as linhagens L217 e L691, que além de apresentarem maiores estimativas de CE, também expressaram maiores valores de RG e VP quando comparadas às demais linhagens. Essas linhagens podem ser recomendadas como genitoras para a obtenção de híbridos superiores.

6.3 – Identificação dos espectros de NIR e construção do modelo de regressão entre os caracteres agrônômicos RG, CE e VP com os índices espectrais

No apêndice A pode-se observar os espectros do infravermelho próximo (NIR) das diferentes amostras, correspondentes às leituras realizadas no colmo das linhagens de milho-pipoca em diferentes datas em relação à antese masculina, em duas condições hídricas (CHs). De maneira geral, as amostras apresentaram perfil espectral semelhante quanto à composição química na região do espectro eletromagnético estudada. Já no apêndice B pode-se observar os pré-processamentos aplicados, isto é, SNV e primeira derivada, buscando suavização do espectro e variação em sua forma geral.

Com esses espectros utilizou-se de procedimentos de regressão nos dados pré tratados com SNV, derivada, e SNV + derivada, entretanto, eles não apresentaram altos valores que indicassem linearidade, resultando em baixo poder de predição

(Tabela 5).

Tabela 5 – Modelos de regressão sem tratamento, com pré-processamento SNV, primeira derivada com ordem e janela de sete pontos, e SNV + primeira derivada para os caracteres agrônômicos RG, CE e VP correlacionados aos espectros de NIR.

Modelos de Regressão				
RG	Sem tratamento	SNV	Derivada	SNV + Derivada
R ² calibração	0,17	0,09	0,11	0,17
R ² predição	0,01	0,07	0,00	0,02
RMSEC	443,63	452,66	461,76	450,24
RMSEP	543,01	481,97	504,56	495,78
VL	5	7	7	8
CE	Sem tratamento	SNV	Derivada	SNV + Derivada
R ² calibração	0,00	0,01	0,05	0,02
R ² predição	0,00	0,00	0,00	0,01
RMSEC	40,99	41,78	40,99	38,88
RMSEP	44,36	42,75	42,07	42,68
VL	2	2	5	3
VP	Sem tratamento	SNV	Derivada	SNV + Derivada
R ² calibração	0,00	0,14	0,10	0,09
R ² predição	0,00	0,13	0,08	0,09
RMSEC	12,61	11,74	121,38	11,94
RMSEP	13,24	12,34	124,23	122,80
VL	2	11	4	5

RG: rendimento de grãos (Kg ha⁻¹), CE: capacidade de expansão (mL g⁻¹), VP: volume de pipoca expandida por hectare (m³ ha⁻¹), SNV: variável normal padrão, R² calibração: coeficiente de determinação de calibração, R² predição: coeficiente de determinação de predição, RMSEC: erro médio de calibração, RMSEP: erro médio de predição, e VL: variáveis latentes.

Além dos coeficientes de correlação abaixo do que geralmente é aceitável (superiores a 0,70), as métricas utilizadas para avaliar os erros de predição, utilizando tanto os dados destinados para calibração quanto para predição (RMSEC e RMSEP, respectivamente), revelaram valores de predição não confiáveis.

Uma explicação para a ausência de correlações pode estar relacionada à curta faixa espectral do equipamento utilizado, de 908 a 1.676 nm, não contemplando, assim, todo o espectro do NIR, uma vez que equipamentos que conseguiram predizer melhor os parâmetros apresentavam faixas abaixo ou acima da utilizada (JIANG et al., 2007; SANSECHAN et al., 2018; FERREIRA de OLIVEIRA et al., 2020). Outra explicação pode estar intimamente relacionada ao preparo da amostra, vez que estudos demonstram a importância do armazenamento e padronização de todas as amostras a 4 °C (SANSECHAN et al., 2018).

Estudos mostram que o espectro de infravermelho é altamente sensível à temperatura devido à quantidade de energia armazenada na molécula (THAMASOPINKUL et al., 2017; CHAPANYA et al., 2019). Algumas investigações têm recomendado que ao se utilizar os espectros quimiométricos de NIR, deve-se evitar a variação de temperatura da amostra, pois a ligação de hidrogênio da molécula de água é facilmente influenciada pela temperatura, o que causam alterações na precisão do modelo (HAGEMAN et al., 2005; COZZOLINO et al., 2007). Além desses fatores, Sanseechan et al. (2018) descreveram que a camada cerosa da cana-de-açúcar influencia na detecção do espectro, sendo necessária uma higienização do colmo ou retirada completa do mesmo para que se possa identificar a sua composição.

No presente trabalho, diversos fatores possivelmente impactaram a identificação dos espectros na cultura do milho-pipoca, como por exemplo a quantidade de amostras avaliadas, o que demanda uma janela temporal que pode ter conseqüenciado na perda da padronização da temperatura e da umidade das amostras. Além disso, as presenças de resíduos do colmo do milho-pipoca podem ter afetado diretamente na leitura espectral.

Diante da ausência de relação entre os caracteres principais do milho-pipoca tentou-se encontrar relação entre os espectros de NIR para saber se eles podem classificar as condições de água aplicada e se podem registrar as mudanças químicas que ocorrem nas plantas em razão dos estádios fenológicas.

6.4 - Os espectros do NIR podem identificar a presença da limitação hídrica no solo e os diferentes estádios fenológicos?

As 669 amostras avaliadas foram divididas em 70% para treino e 30% para teste, compreendendo, respectivamente, 468 e 201 amostras. Como resultados da precisão e sensibilidade, constatou-se que na condição WS houve uma precisão de 0,91 e sensibilidade de 0,97, ao passo que para WW a precisão foi de 0,97 e a sensibilidade de 0,92 (Tabela 6).

O modelo testado expressou média de 94,60% e, portanto, pode-se realizar a predição da condição hídrica (WS ou WW) com alta confiabilidade. A alta sensibilidade do equipamento na detecção da molécula de água deve-se à sua intensa absorção. De fato, muitas pesquisas utilizam tal técnica para a detecção e quantificação dos teores de água em diferentes culturas (RUMPF et al., 2010; SANSECHAN et al., 2018; CHAPANYA et al., 2019; FARBER et al., 2019; FERREIRA DE OLIVEIRA et al., 2020; PHUPHAPHUD et al., 2020; ZAHIR et al., 2022).

Tabela 6 – Índices de previsão e sensibilidade para testar as condições hídricas aplicadas na cultura no milho-pipoca cultivada em 2021.

Classe	Precisão	Sensibilidade	Leituras analisadas	Amostras analisadas
WS	0,91	0,97	102	34
WW	0,97	0,92	99	33

WS – déficit hídrico; e WW – irrigação plena.

A matriz de confusão entre as condições hídricas revelou elevada acurácia na predição das classes (Tabela 7). Vale destacar que nessa matriz torna-se possível observar o erro entre as classes, sendo assim, o modelo acertou em 97% a predição da classe WS, com 0,03% dos dados sendo classificados erroneamente em WW; e, em 92% para a classe WW, com 0,08% sendo classificados erroneamente em WS.

Tabela 7 – Matriz de confusão com modelos preditivos de erro e acerto entre as classes WS e WW (dados em %) utilizando os espectros de NIR obtidos de diferentes condições hídricas aplicadas na cultura do milho-pipoca cultivada em 2021.

Classes	Predição	
	WS	WW
WS	0,97	0,03
WW	0,08	0,92

A coloração “azul escuro” demonstra a correlação da classe com ela mesma e o seu percentual de predição.

O processo de classificação foi repetido 30 vezes sendo que para cada processo foram determinados diferentes conjuntos de amostras, em que 30% compreende o teste, realizando o tratamento dos dados por derivada seguida de SNV, juntamente com a utilização do classificador LDA (Figura 3).

A média da acurácia das 30 rodadas de classificação foi de 91,50%, reproduzindo, assim, a capacidade preditiva do modelo. Verificou-se também baixa variação da acurácia entre as predições, demonstrando a robustez dos dados para a classificação da condição hídrica.

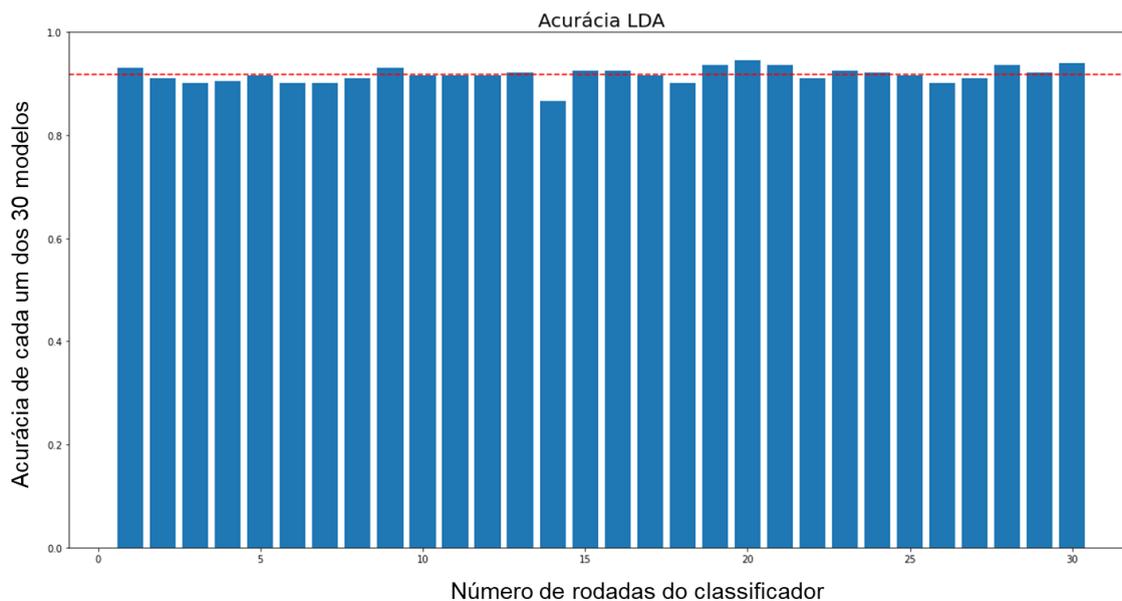


Figura 3 – Acurácia média das 30 rodadas do modelo LDA para classificação da condição hídrica aplicada na cultura do milho-pipoca cultivada em 2021.

O classificador apresentou acurácia de 91,5% na identificação de genótipos submetidos ao déficit hídrico. Com isso, tomou-se posse de uma importante ferramenta de identificação precoce e não destrutiva do teor de água no colmo. Funcionando como uma importante ferramenta na seleção de genótipos de forma assertiva e precoce.

Para as classes “dias em relação a antese”, a de ordem -19, por meio de 21 leituras de NIR e de 7 amostras, revelou precisão de 1,00 e sensibilidade de 1,00. Já para a classe -6 foram analisadas 42 leituras e 14 amostras expressaram estimativa média de 0,98 de precisão e 1,00 de sensibilidade. Na classe 3 foram realizadas 42 leituras em 14 amostras com estimativa de precisão e sensibilidade de 1,00. Na classe 11 foram realizadas 48 leituras em 16 amostras analisadas, revelando precisão e sensibilidade de 1,00. Já para a classe 23 também foram realizadas 48 leituras em 16 amostras com precisão e sensibilidade de 1,00.

Tabela 8 – Índices de precisão e sensibilidade para testar classes (dias) decorrentes da antecedência ou a posterior da antese masculina na classificação de diferentes datas avaliadas em duas condições hídricas aplicadas na cultura no milho-pipoca cultivada em 2021.

Classe	Precisão	Sensibilidade	Leituras analisadas	Amostras analisadas
-19	1,00	1,00	21	7
-6	0,98	1,00	42	14
3	1,00	0,97	42	14
11	1,00	1,00	48	16
23	1,00	1,00	48	16

-19: significa 19 dias antes da antese masculina, -6: refere-se a 6 dias antes da antese masculina, 3: implica em 3 dias após a antese masculina, 11: significa 11 dias após a antese masculina, e 23: refere-se a 23 dias após a antese masculina.

Com base na matriz de confusão das classes “dias em relação a antese”, constata-se que a classe -19 apresentou 100% de acurácia ao associar os dados da mesma classe, não apresentando qualquer erro de predição para com as demais. O mesmo ocorreu para as classes -6, 3 e 23. Já a classe 11 apresentou 97% de acurácia, ao correlacionar ela consigo própria; entretanto, apresentou erro de 0,02% ao classificar erroneamente os dados da classe 11 com a classe -6 (Tabela 9).

Tabela 9 – Matriz de confusão com modelos preditivos de erro e acerto entre as classes (dias) decorrentes da antecedência ou a *posteriori* da antese masculina (dados em %) utilizando os dados de espectrais de NIR obtidos de diferentes datas de avaliação em milho-pipoca cultivado em 2021.

Classes	Predição				
	-19	-6	3	11	23
-19	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-6	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
11	0,00	0,02	0,00	0,97	0,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00

A “coloração azul” escuro demonstra a correlação da classe com ela mesma e o seu percentual de predição. A coloração “azul claro” demonstra a predição em que a classe apresentou erro.

A alta acurácia do modelo de classificação para os dias em relação à antese masculina foi observada realizando-se a escolha de 30 diferentes amostras para compor as classes de treinamento e teste do modelo, via classificador LDA. Em média, a acurácia das 30 classificações foi de 99%, demonstrando que é possível diagnosticar a data de mensuração em relação à antese masculina utilizando a espectroscopia NIR. (Figura 4).

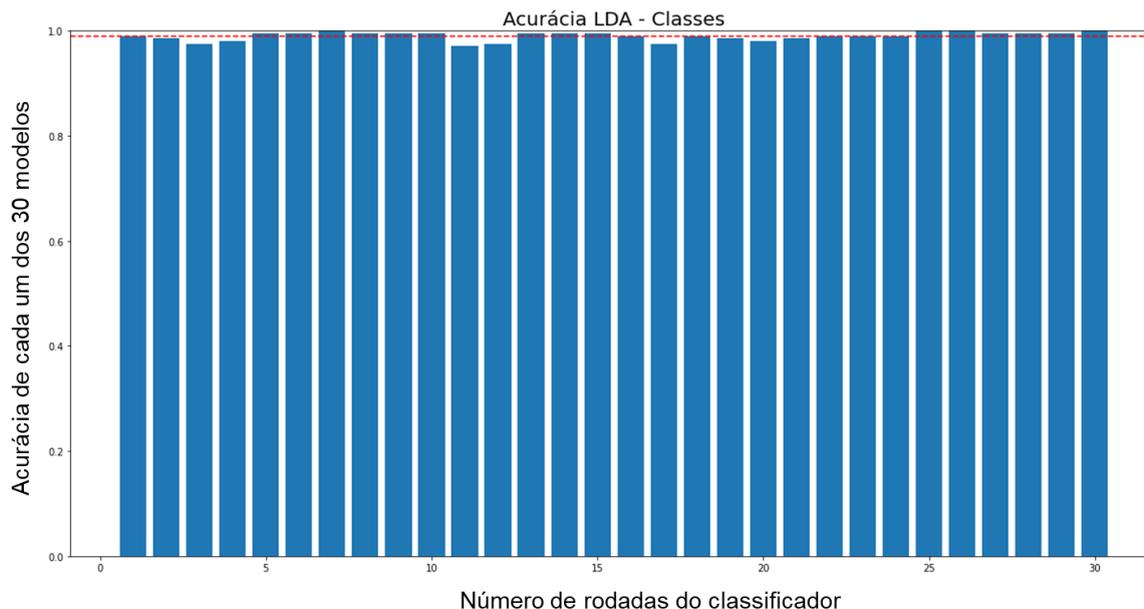


Figura 4 – Acurácia média das 30 rodadas do modelo LDA para classificação decorrente da antecedência ou a *posteriori* da antese masculina com base em diferentes datas para duas condições hídricas aplicadas na cultura no milho-pipoca cultivada em 2021.

Por fim, testou-se um modelo de classificação capaz de prever os dias em relação ao florescimento masculino do milho-pipoca, juntamente com seu estresse hídrico, utilizando a espectroscopia NIR (Tabela 10). Pode-se verificar que em WS a -19 dias da antese para um total de 39 leituras em 13 amostras foi possível obter precisão e sensibilidade de 1,00. Na classe WS -6 foram realizadas 21 leituras em 7 amostras, com precisão de 0,78 e sensibilidade de 1,00. Na classe WS 11 foram realizadas 21 leituras para 7 amostras, com precisão e sensibilidade de 0,95. Já na classe 23 houve 18 leituras em 6 amostras, com 0,78 de precisão e 1,00 de sensibilidade. Em relação à classe WW -19 foram realizadas 9 leituras em 3 amostras, com precisão e sensibilidade de 0,94. Na classe WW -6 foram realizadas 27 leituras em 9 amostras, com 0,96 de precisão e 0,77 de sensibilidade. Na classe WW 3 foram realizadas 21 leituras em 7 amostras com precisão e sensibilidade de 1,00. Já para a classe WW 11 foram feitas 18 leituras em 6 amostras com 0,94 de precisão e de sensibilidade. Por fim, para a classe WW houve 21 leituras em 7 amostras com precisão e sensibilidade de 1,00.

Tabela 10 – Índices de previsão e sensibilidade para testar a classificação da condição hídrica aplicada e as classes (dias) decorrentes da antecedência ou *a posteriori* à antese masculina com classificação em diferentes datas e em duas condições hídricas aplicadas na cultura no milho-pipoca cultivada em 2021.

Classe	Precisão	Sensibilidade	Leituras analisadas	Amostras analisadas
WS -19	1,00	1,00	39	13
WS -6	0,78	1,00	21	7
WS 11	0,95	0,95	21	7
WS 23	0,78	1,00	18	6
WW -19	0,94	0,94	9	3
WW -6	0,95	0,77	27	9
WW 3	1,00	1,00	21	7
WW 11	0,94	0,94	18	6
WW 23	1,00	0,81	33	11

WS: condição de déficit hídrico, WW: condição de irrigação plena. Valores negativos se referem aos dias em que foram avaliadas as amostras antes da antese masculina e os valores positivos se referem aos dias em que foram analisadas as amostras após a ocorrência da antese masculina.

Observando a matriz de confusão do modelo proposto (Tabela 11), é possível verificar que as leituras amostrais que foram classificadas incorretamente foram preditas nas classes de mesmo tempo de florescimento, porém com o estresse hídrico classificado de forma errônea. Ou seja, o classificador foi capaz de detectar todas as etapas de florescimento de forma correta, errando apenas o estresse hídrico de algumas leituras. Com isso, foi possível observar que a classe WS -19 apresentou acurácia de 1,00 e não expressou qualquer erro de predição, o mesmo ocorrendo para com as classes WS -6, WS 23, WW -19 e WW 3. A classe WS 11 apresentou 0,95 de correlação consigo própria, porém com estimativa de 0,05 de erro em WW 11. Já a classe WW -6 apresentou 0,77 de acurácia de correlação com ela mesma, porém com erro de 0,23 para com a classe WS -6. A classe WW 11 apresentou 0,94 de acurácia de correlação com ela mesma, entretanto, revelou 0,06 de erro com a classe WS 11. Por fim, a classe WW 23 apresentou 0,81 de acurácia com ela mesma, mas com erro de 0,03 para com a classe WW -6 e de 0,16 para a classe WS 23.

Tabela 11 – Matriz de confusão com modelos preditivos de erro e acerto para a classificação da condição hídrica aplicada, bem como as classes (dias) decorrentes das avaliações antecedentes e posteriores à antese masculina para a cultura do milho-pipoca cultivada em 2021.

Classes	Predição								
	WS-19	WS-6	WS11	WS23	WW-19	WW-6	WW3	WW11	WW23
WS-19	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
WS-6	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
WS11	0,00	0,00	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00
WS23	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
WW-19	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00
WW-6	0,00	0,23	0,00	0,00	0,00	0,77	0,00	0,00	0,00
WW3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00
WW11	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,94	0,00
WW23	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,03	0,00	0,00	0,81

A “coloração azul” escuro demonstra a correlação da classe com ela mesma e o seu percentual de predição. A coloração “azul claro” demonstra onde a classe apresentou erro de predição.

Esse mesmo classificador LDA foi realizado em 30 diferentes conjuntos de amostras para compor o treinamento/teste a fim de realizar uma classificação conjunta do estresse hídrico em relação ao tempo de florescimento. A alta acurácia também foi mantida, apresentando uma média de 92,93% para os diferentes cenários. Para essa caracterização, considerando-se o pontilhado vermelho representando a acurácia média do modelo, constatou-se baixa variabilidade da acurácia, o que demonstra a capacidade e robustez na classificação, com alto índice de acerto (Figura 5).

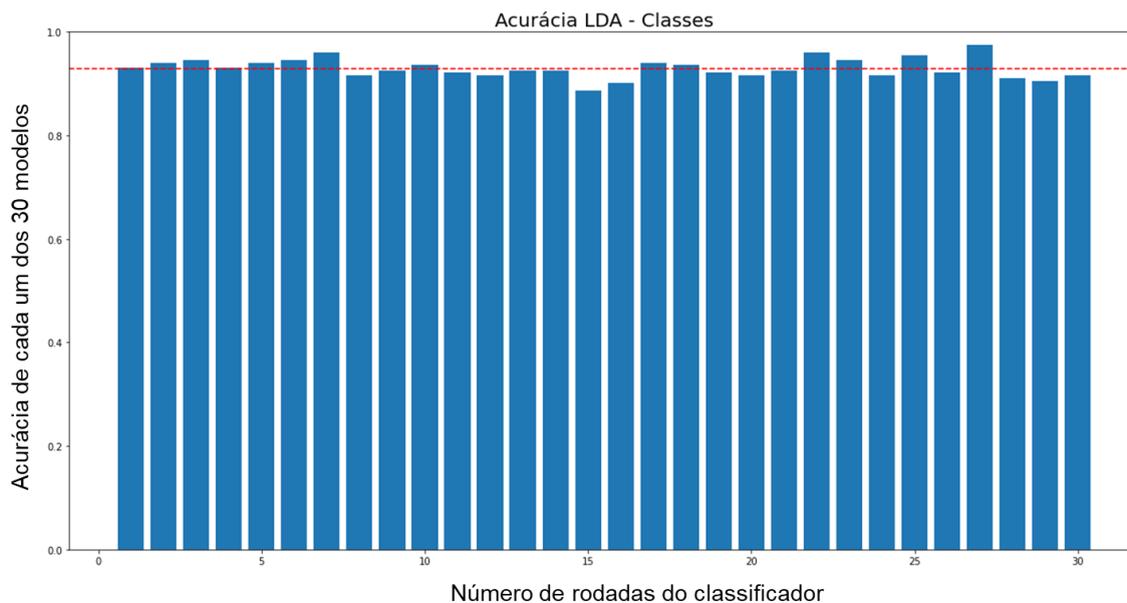


Figura 5 – Acurácia média de 30 rodadas do modelo para a classificação da condição hídrica aplicada decorrente das avaliações anteriores e posteriores à antese masculina para a cultura do milho-pipoca cultivada em 2021.

6.5 - Implicações da utilização do espectro de NIR para o melhoramento de plantas

No presente estudo não foi possível associar os espectros do NIR com as características RG, CE e VP, em milho-pipoca, que permitisse uma alternativa de seleção indireta. Diversos fatores podem ter afetado diretamente na ausência de correlação espectral, dentre eles, destacam-se: o espectro reduzido do equipamento utilizado (JIANG et al., 2007; SANSECHAN et al., 2018; FERREIRA DE OLIVEIRA et al., 2020), a temperatura não homogênea das avaliações devido à janela temporal em que estas ocorreram (THAMASOPINKUL et al., 2017; CHAPANYA et al., 2019), bem como à possibilidade de contaminação do colmo, decorrente da presença de cerosidade ou de resíduos (SANSECHAN et al., 2018).

Todavia, o espectro de NIR foi eficiente em discriminar as condições hídricas e os dias em relação à antese masculina, possivelmente devido à detecção das mudanças químicas que ocorrem na planta, por consequência de mudanças na fonte e no dreno (ZHAO et al., 2012; SAH et al., 2020). O NIR também foi capaz de discriminar conjuntamente a condição hídrica e os dias em relação à antese masculina, sendo possível identificar o estágio em que a planta se encontra juntamente com a condição hídrica. No entanto, vale destacar que o estágio fenológico é facilmente identificado por características morfológicas, mas a identificação

associada à condição hídrica tem muito a contribuir com os programas de melhoramento.

O presente estudo contribui com maestria para a aquafotômica, que demonstra a interação da água com a luz e, quando essa interação ocorre, um certo padrão espectral da água é gerado para fornecer informações específicas em diferentes perturbações e em diferentes indivíduos (ZAHIR et al., 2022). Este método tem sido amplamente utilizado em estudos incluindo a tolerância das plantas à dissecação (CATTANEO et al., 2019; FARBER et al., 2019; KUROKI et al., 2019), sendo assim uma ferramenta importante para ser utilizada em programas de melhoramento genético com milho-pipoca. Porém, para que se torne possível uma elucidação com mais afinco sobre as modificações químicas causadas nos diferentes estádios fenológicos, torna-se necessário um maior número de genótipos e repetições para aumentar a confiabilidade na geração dos dados, bem como, a utilização de um equipamento que possibilite detectar todo o espectro do NIR.

7- CONCLUSÕES

A linhagem L691 – superiora para RG, CE e VP em WS –, bem como L217 – superiora para RG e VP em WS – e L220, L510 e L684 – superiores para CE em WS – são de interesse para comporem sintético visando à obtenção de segregantes superiores quanto à expansão e produção de grãos em ambiente de seca.

A espectroscopia NIR não expressou associação que permitisse seleção indireta de RG, CE ou VP, o que pode estar relacionado ao curto espectro do equipamento utilizado, à não padronização da temperatura e, ou à presença de resíduos e cera no colmo das amostras.

A espectroscopia NIR possibilitou a discriminação da condição hídrica em relação ao estágio fenológico da planta, recomendando-se a realização de novos estudos com maior número de genótipos e melhor padronização na obtenção dos dados, no intento de prever com fidedignidade os índices espectrais que permitam vislumbrar a possibilidade de discriminação de genótipos com adaptação ao déficit hídrico.

8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEBAYO, M. A. et al. Genetic analysis of drought tolerance in adapted × exotic crosses of maize inbred lines under managed stress conditions. **Euphytica**, v. 196, n. 2, p. 261–270, mai. 2014.

AFSHAR, K. et al. Biochar Application and Drought Stress Effects on Physiological Characteristics of *Silybum marianum*. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v.1, p. 1-22, fev. 2016.

AHAMED, I. et al. Tolerance to Combined Stress of Drought and Salinity in Barley. **Springer**. v. 3, n. 2, p. 1-11, jan. 2014.

ALI, F. et al. Phenotypic stability of *Zea mays* grain yield and its attributing traits under drought stress. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n.2, p. 1–11, ago. 2017.

ARAUS, J. L. et al. Translating High-Throughput Phenotyping into Genetic Gain. Trends in Plant Science, **Elsevier**, v. 196, n. 2, p. 261–270, 1 mai. 2018.

ARAUS, J. L.; SÁNCHEZ, C.; CABRERA-BOSQUET, L. Is heterosis in maize mediated through better water use? **New Phytologist**, v. 187, n. 2, p. 392–406, jul. 2010.

ARAUS, J. L.; SERRET, M. D.; EDMEADES, G. O. Phenotyping maize for adaptation to drought. **Frontiers in Physiology**, v. 3, n.2, p. 1–20, ago.2012.

AWANGE, J. L.; MPELASOKA, F.; GONCALVES, R. M. When every drop counts: Analysis of Droughts in Brazil for the 1901-2013 period. **Science of The Total Environment**, v. 566–567, p. 1472–1488, out. 2016.

BARROS, I. H. A. S. et al. Use of portable Raman spectroscopy in the quality control of extra virgin olive oil and adulterated compound oils. **Vibrational Spectroscopy**, v. 116, 1 set. 2021.

BENCHIKH-LEHOCINE, M. et al. Response to Selection for Reduced Anthesis-Silking Interval in Four Algerian Maize Populations. **Agronomy**, v. 11, n. 2, p. 382, 20 fev. 2021.

BERRUETA, L. A.; ALONSO-SALCES, R. M.; HÉBERGER, K. **Supervised pattern recognition in food analysis**. **Journal of Chromatography A**, v. 1, p. 1472–1488, 27 jul. 2007.

BERTOLUCCI, M. F. Análise da concentração e expansão da produção e do beneficiamento do milho-pipoca (*Zea mays* L. var. everta (Sturtev.) L. H. Bailey) no Brasil. **Universidade Federal de Goiás**, v. 11, n. 2, p. 382, fev. 2022.

BOLAÑOS, J.; EDMEADES, G. O. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. I. Responses in grain yield, biomass, and radiation

utilization. **Field Crops Research**, v. 31, n. 3–4, p. 233–252, jan. 1993.

BRASIL, P. A. **Precota Agro Brasil**. Disponível em: <<https://precota.com.br/agro/grafico-preco-tabela-milho-pipoca-ceasa-belo-horizonte-sc-60-kg/>>. Acesso em: 19 set. 2022.

CAIRNS, J. E. et al. Dissecting Maize Productivity: Ideotypes Associated with Grain Yield under Drought Stress and Well-watered Conditions. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 54, n. 12, p. 1007–1020, dez. 2012.

CÂMARA, T. M. M. et al. Parâmetros genéticos de caracteres relacionados à tolerância à deficiência hídrica em milho tropical. **Bragantia**, v. 66, n. 4, p. 595–603, 2007.

CATALHO, L. **Mais de 100 cidades do Paraná têm produção de milho-pipoca**. Disponível em: <<https://www.folhadelondrina.com.br/folha-rural/mais-de-100-cidades-do-parana-tem-producao-de-milho-pipoca-3062924e.html#:~:text=Consumo>>. Acesso em: 19 set. 2022.

CATTANEO, T. M. P.; STELLARI, A. Review: NIR spectroscopy as a suitable tool for the investigation of the horticultural field. **Agronomy**, v. 9, n. 9, set. 2019.

CHAGAS DE SOUSA, L. et al. Desenvolvimento de modelos de calibração NIRs para minimização das análises de madeira de *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**, p. 591–599, set. 2011.

CHAGAS, W. F. T. et al. Amylose content and micromorphology of popcorn progenies with different popping expansion volumes. **Ciencia Rural**, v. 50, n. 2, ago. 2020.

CHAPANYA, P. et al. Temperature Compensation on Sugar Content Prediction of Molasses by Near-Infrared Spectroscopy (NIR). **Sugar Tech**, v. 21, n. 1, p. 162–169, 13 fev. 2019.

CHEN, Z. et al. Morpho-physiological and proteomic responses to water stress in two contrasting tobacco varieties. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 1 dez. 2019.

BORTOLINI, C. et al. Rendimento de grãos de milho cultivado após aveia-preta em resposta a adubação nitrogenada e regime hídrico. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 36, n. 9, p. 1101–1106, nov. 2001.

COAN, M. M. D et al. Inheritance study for popping expansion in popcorn vs. Flint corn genotypes. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 5, p. 2174–2183, 1 set. 2019.

CORREIA, P. et al. Efficient Regulation of CO₂ Assimilation Enables Greater Resilience to High Temperature and Drought in Maize. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, 26 jul. 2021.

COSTA, J; PINHO, J; PARRY, M. Produção de matéria seca de cultivares de milho sob diferentes níveis de estresse hídrico. **Revista Brasileira de Engenharia**

Agrícola e Ambiental, v. 12, n. 5, p. 443–450, nov. 2008.

COSTA, E. et al. Herança da senescência retardada em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 2, p. 207–213, fev. 2008.

COZZOLINO, D. et al. Effect of temperature variation on the visible and near infrared spectra of wine and the consequences on the partial least square calibrations developed to measure chemical composition. **Analytica Chimica Acta**, v. 588, n. 2, p. 224–230, 11 abr. 2007.

COZZOLINO, D.; FASSIO, A.; GIMENEZ, A. The use of near-infrared reflectance spectroscopy (NIRS) to predict the composition of whole maize plants. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 81, n. 1, p. 142–146, 1 jan. 2001.

DAROS, M. et al. Correlações entre caracteres agronômicos em dois ciclos de seleção recorrente em milho-pipoca. **Ciência Rural**, v. 34, n. 5, p. 1389–1394, mar. 2004.

PINA MATTA, F.; SORIANO VIANA, J. M. Popping expansion tests in popcorn breeding programs. **Scientia Agrícola**, v. 58, n. 4, p. 845–851, fev. 2001.

AMARAL JUNIOR, A. T. et al. UENF 14: A new popcorn cultivar. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 13, n. 3, p. 218–220, abr. 2013.

DURÃES, F. O. M. et al. Fenotipagem Associada a Tolerância a Seca em Milho para Uso em Melhoramento, Estudos Genômicos e Seleção Assistida por Marcadores. **Embrapa Milho e Sorgo**, v. 39, p. 18, out. 2004.

EHLERT, C. et al. Aquaporin-mediated reduction in maize root hydraulic conductivity impacts cell turgor and leaf elongation even without changing transpiration 1. **Plant Physiology**, v. 150, n. 2, p. 1093–1104, nov. 2009.

ESTEVE AGELET, L. et al. Measurement of single soybean seed attributes by near-infrared technologies. A comparative study. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 60, n. 34, p. 8314–8322, 29 ago. dez. 2012.

FARBER, C. et al. Advanced spectroscopic techniques for plant disease diagnostics. A review: Trends in Analytical Chemistry **Elsevier B.V1** set. 2019.

FAROOQ, M.; HUSSAIN, M.; SIDDIQUE, K. H. M. Drought Stress in Wheat during Flowering and Grain-filling Periods. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 33, n. 4, p. 331–349, dez. 2014.

FASSIO, A. S.; RESTAINO, E. A.; COZZOLINO, D. Determination of oil content in whole corn (*Zea mays* L.) seeds by means of near infrared reflectance spectroscopy. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 110, p. 171–175, 1 jan. 2015.

FERREIRA DE OLIVEIRA, G. H. et al. Estimation and classification of popping expansion capacity in popcorn breeding programs using NIR spectroscopy. **Journal of Cereal Science**, v. 91, p. 331–349, 1 jan. 2020.

FILHO, I.; BORGHI, E. **Milho-pipoca é um novo atrativo para o produtor?** Disponível em: <<https://revistacampoenegocios.com.br/milho-pipoca-e-um-novo-atrativo-para-o-produtor/>, (2019)>. Acesso em: 19 set. 2022.

FREITAS JÚNIOR, S. et al. Genetic gain prediction on UNB-2U popcorn population under recurrent selection by using different selection indexes. **Ciências Agrárias**, v. 30, p. 803–8014, jan. 2009.

HAGEMAN, J. A.; WESTERHUIS, J. A.; SMILDE, A. K. Temperature robust multivariate calibration: an overview of methods for dealing with temperature influences on near infrared spectra. **J. Near Infrared Spectrosc**, v. 13, p. 53, jan. 2005.

HALLAUER, A. R.; CARENA, M. J.; FILHO, J. B. M. Quantitative Genetics in Maize Breeding. **Handbook of Plant Breeding**, v. 6, n. 34, p. 99, fev. 2010.

JAMSHIDI, B. et al. Reflectance Vis/NIR spectroscopy for nondestructive taste characterization of Valencia oranges. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 85, p. 64–69, jul. 2012.

JIANG, G. L. Comparison and application of non-destructive NIR evaluations of seed protein and oil content in soybean breeding. **Agronomy**, v. 10, n. 1, fev. 2020.

JIANG, H. Y. et al. Analysis of protein, starch and oil content of single intact kernels by near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) in maize (*Zea mays* L.). **Plant Breeding**, v. 126, n. 5, p. 492–497, out. 2007.

JONES, R.; CROOKSTON, R. K. Thermal Environment During Endosperm Cell Division and Grain Filling in Maize: Effects on Kernel Growth and Development in Vitro. **Scientific Journal Series**, v. 13, n. 2, p. 342, jan. 1984.

JOSHI, A. K. et al. Stay green trait: variation, inheritance and its association with spot blotch resistance in spring wheat (*Triticum aestivum* L.). **Euphytica**, v. 153, n. 1–2, p. 59–71, 13 dez. 2006.

KAMPHORST, S. H. et al. Popcorn breeding for water-stress tolerance or for agronomic water-use efficiency? **Genetics and Molecular Research**, v. 17, n. 4, p. 1–18, 2018a.

KAMPHORST, S. H. et al. Can Genetic Progress for Drought Tolerance in Popcorn Be Achieved by Indirect Selection? **Agronomy**, v. 9, n. 12, p. 792, nov. 2019.

KAMPHORST, S. H. et al. Comparison of Selection Traits for Effective Popcorn (*Zea mays* L. var. Everta) Breeding Under Water Limiting Conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, ago. 2020a.

KAMPHORST, S. H. et al. Screening of Popcorn Genotypes for Drought Tolerance Using Canonical Correlations. **Agronomy**, v. 10, n. 10, p. 1519, out. 2020b.

KAUR, H. et al. Scrutinizing the impact of water deficit in plants: Transcriptional regulation, signaling, photosynthetic efficacy, and management. **Physiologia**

Plantarum, v. 172, n. 2, p. 935–962, 1 jun. 2021.

KNUTTI, R. et al. A scientific critique of the two-degree climate change target. *Nature Geoscience*. **Nature Publishing Group**. v. 172, n. 2, p. 935–962. 1 jan. 2016.

KUROKI, S. et al. Water molecular structure underpins extreme desiccation tolerance of the resurrection plant *Haberlea rhodopensis*. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 1 dez. 2019.

LEITE, D. C. et al. Non-destructive genotypes classification and oil content prediction using near-infrared spectroscopy and chemometric tools in soybean breeding program. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 91, 1 ago. 2020.

LEITE, J. T. et al. Water use efficiency in popcorn (*Zea mays* L. var. *everta*): Which physiological traits would be useful for breeding? **Plants**, v. 10, n. 7, p. 1–17, mai. 2021.

LEITE, J. T. et al. All Are in a Drought, but Some Stand Out: Multivariate Analysis in the Selection of Agronomic Efficient Popcorn Genotypes. **Plants**, v. 11, n. 17, p. 2275, 31 ago. 2022.

LI, X.-H. et al. Identification of quantitative trait loci for anthesis-silking interval and yield components under drought stress in maize. **Acta Botanica Sinica**, v. 45, n. 7, p. 852–857, jun. 2003.

LIMA, V. J. DE et al. Combining ability of S 3 progenies for key agronomic traits in popcorn: comparison of testers in top-crosses. **Genetics and Molecular Research**, v. 15, n. 4, jul. 2016.

LIMA, V. J. DE et al. Combined Dominance and Additive Gene Effects in Trait Inheritance of Drought-Stressed and Full Irrigated Popcorn. **Agronomy**, v. 9, n. 12, p. 782, nov. 2019.

LIU, S.; QIN, F. Genetic dissection of maize drought tolerance for trait improvement. *Molecular Breeding* **Springer Science and Business** v. 9, n. 12, p. 782, nov. 2021.

LUNDUKA, R. W. et al. Impact of adoption of drought-tolerant maize varieties on total maize production in south Eastern Zimbabwe. **Climate and Development**, v. 11, n. 1, p. 35–46, 2 jan. 2019.

NASRIN, S. et al. Impacts of drought stress on growth, protein, proline, pigment content and antioxidant enzyme activities in rice (*Oryza sativa* L. var. BRR1 dhan-24). **Dhaka University Journal of Biological Sciences**. v.29, p. 117-123, jan. 2020.

MAFRA, G. et al. The combining ability of popcorn S7 lines for Puccinia polysora resistance purposes. **Science**, v. 77, n. 4, p.519-526, 2018, mar. 2018.

MÁRCIA, A. et al. MATURAÇÃO DE SEMENTES DE MILHO-PIPOCA. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, n. 3, p. 121–131, mai. 2003.

MEES, C. et al. Identification of coffee leaves using FT-NIR spectroscopy and SIMCA. **Talanta**, v. 177, p. 4–11, 15 jan. 2018.

MIR, R. R. et al. Integrated genomics, physiology and breeding approaches for improving drought tolerance in crops. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 125, n. 4, p. 625–645, ago. 2012.

MISHRA, P. et al. Improving moisture and soluble solids content prediction in pear fruit using near-infrared spectroscopy with variable selection and model updating approach. **Postharvest Biology and Technology**, v. 171, n. 3, p. 111-148, jun. 2021.

MISHRA, P.; WOLTERING, E.; EL HARCHIOUI, N. Improved prediction of 'Kent' mango firmness during ripening by near-infrared spectroscopy supported by interval partial least square regression. **Infrared Physics and Technology**, v. 110, n. 03, p. 246-587, jun. 2020.

MONNEVEUX, P.; SANCHEZ, C.; TIESSEN, A. Future progress in drought tolerance in maize needs new secondary traits and cross combinations. **The Journal of Agricultural Science**, v. 146, n. 03, p. 287–300, jun. 2008.

OZANAN, F. et al. Fenotipagem para tolerância a seca visando o melhoramento genético de milho na EMBRAPA. **Embrapa Milho e Sorgo**, v. 1, p. 537–542, mai. 2004.

PARSONS, L. et al. Production and Selection of Quality Protein Popcorn Hybrids Using a Novel Ranking System and Combining Ability Estimates. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, 23 jun. 2020.

PENA, G. F. et al. Mixed Modeling in Genetic Divergence Study of Elite Popcorn Hybrids (*Zea mays* var. *everta*). **Agriculture (Switzerland)**, v. 12, n. 7, 1 jul. 2022.

PEREIRA, M. G.; AMARAL JÚNIOR, A. T. Estimation of Genetic Components in Popcorn Based on the Nested Design. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 1, n. 1, p. 3–10, 31 mar. 2001.

PHUPHAPHUD, A. et al. Non-destructive and rapid measurement of sugar content in growing cane stalks for breeding programmes using visible-near infrared spectroscopy. **Biosystems Engineering**, v. 197, p. 76–90, 1 set. 2020.

POSSATO, O. et al., Evidence of additive inheritance of popping expansion in popcorn. **Functional Plant Breeding Journal**. v. 3, p 51-59, 4 jul. 2021)

PIPATSITEE, P. et al. Physio-morphological traits and osmoregulation strategies of hybrid maize (*Zea mays*) at the seedling stage in response to water-deficit stress. **Protoplasma**, v. 259, n. 4, p. 869–883, 1 jul. 2022.

PUTZIG, C. L. et al. Infrared Spectroscopy Analytical Chemistry. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/sharingguidelines>>. Acesso em: 21 set. 2022.

ROMANO, et al. Use of thermography for high throughput phenotyping of tropical maize adaptation in water stress. **Comput. Electron. Agric.** V. 79, n. 3 p. 67–74, 1 jun 2011.

ROZZA, A. et al. Novel Fisher discriminant classifiers. **Pattern Recognition**, v. 45, n. 10, p. 3725–3737, out. 2012.

RUMPF, T. et al. Early detection and classification of plant diseases with Support Vector Machines based on hyperspectral reflectance. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 74, n. 1, p. 91–99, out. 2010.

SAH, R. P. et al. Impact of water deficit stress in maize: Phenology and yield components. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 43-57 1 dez. 2020.

SANSECHAN, P. et al. A portable near infrared spectrometer as a non-destructive tool for rapid screening of solid density stalk in a sugarcane breeding program. **Sensing and Bio-Sensing Research**, v. 20, p. 34–40, 1 set. 2018.

SANTOS, M. X. et al. Comportamento de Híbridos de Milho Seleccionados e não Seleccionados para Asi sob Estresse de Água no Florescimento e no Enchimento de Grãos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 2, n. 2, p. 71–81, ago. 2003.

SANTOS, T. DE O. et al. Phenotyping latin american open-pollinated varieties of popcorn for environments with low water availability. **Plants**, v. 10, n. 6, 1 jun. 2021.

SAWAZAKI, E. A cultura do milho pipoca no Brasil. **O agrônomo**, v. 53, n. 2, p. 11–13, set. 2001.

SCHAARE, P. N.; FRASER, D. G. Comparison of reflectance, interactance and transmission modes of visible-near infrared spectroscopy for measuring internal properties of kiwifruit (*Actinidia chinensis*) **Postharvest Biology and Technology**. , v. 53, n. 2, p. 11–13, nov. 2000.

SCHWANTES. I. A; Diallel analysis of resistance to Fusarium ear rot in Brazilian popcorn genotypes. **Springer**. V.42 n. 1, p. 70–75 jun 2017.

SELEIMAN, M. F. et al. Plants Drought Stress Impacts on Plants and Different Approaches to Alleviate Its Adverse Effects. **Plants**, v. 10, n. 2, p. 259, dez. 2021.

SOARES, M. O. et al. Parâmetros genéticos de uma população de milho em níveis contrastantes de nitrogênio. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 42, n. 1, p. 168–174, mar. 2011.

SOYLU, S.; TEKKANAT, A. Interactions amongst kernel properties and expansion volume in various popcorn genotypes. **Journal of Food Engineering**, v. 80, n. 1, p. 336–341, mai. 2007.

STEVE, I. O.; BABATUNDE, O. I. Chemical Compositions and Nutritional Properties of Popcorn-Based Complementary Foods Supplemented With Moringa oleifera Leaves Flour. **Journal of Food Research**, v. 2, n. 6, p. 117, mar. 2013.

TARDIEU, F.; GRANIER, C.; MULLER, B. Water deficit and growth. Coordinating processes without an orchestrator? **Plant Biology**, v. 42, n. 1, p. 168–174, jun. 2011.

TEIXEIRA, F. F. et al. Evaluation of maize core collection for drought tolerance. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 10, n. 4, p. 312–320, dez. 2010.

THAMASOPINKUL, C. et al. Temperature compensation for determination of moisture and reducing sugar of longan honey by near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 25, n. 1, p. 36–44, 1 jan. 2017.

TOLLENAAR, M.; AHMADZADEH, A.; LEE, E. A. Physiological Basis of Heterosis for Grain Yield in Maize. **Crop Science**, v. 44, n. 6, p. 2086, jun. 2004.

VAN LOON, A. F. et al. Drought in the Anthropocene. **Nature Geoscience**, v. 9, n. 2, p. 89–91, fev. 2016.

VILLESSECHE, H. et al. Unsupervised analysis of NIRS spectra to assess complex plant traits: leaf senescence as a use case. **Plant Methods**, v. 18, n. 1, 1 dez. 2022.

VIROT, E.; PONOMARENKO, A. Popcorn: Critical temperature, jump and sound. **Journal of the Royal Society Interface**, v. 12, n. 104, p.73-97, mar. 2015.

WICKHAM, H. (2016) ggplot2: elegant graphics for data analysis. **Springer**

WOLD, S. et al. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 58, n.2. p. 98–109, mar.2001

YEH, T. F. et al. Rapid screening of wood chemical component variations using transmittance near-infrared spectroscopy. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 53, n. 9, p. 3328–3332, 4 mai 2005.

ZAHIR, S. A. D. M. et al. A review of visible and near-infrared (Vis-NIR) spectroscopy application in plant stress detection. **Sensors and Actuators A: Physical Elsevier B.V**, v. 58, n.2. p. 44-65, mai 2022.

ZAIDI, P. H. et al. Gains from improvement for mid-season drought tolerance in tropical maize (*Zea mays* L.). **Field Crops Research**, v. 89, n. 1, p. 135–152, set. 2004.

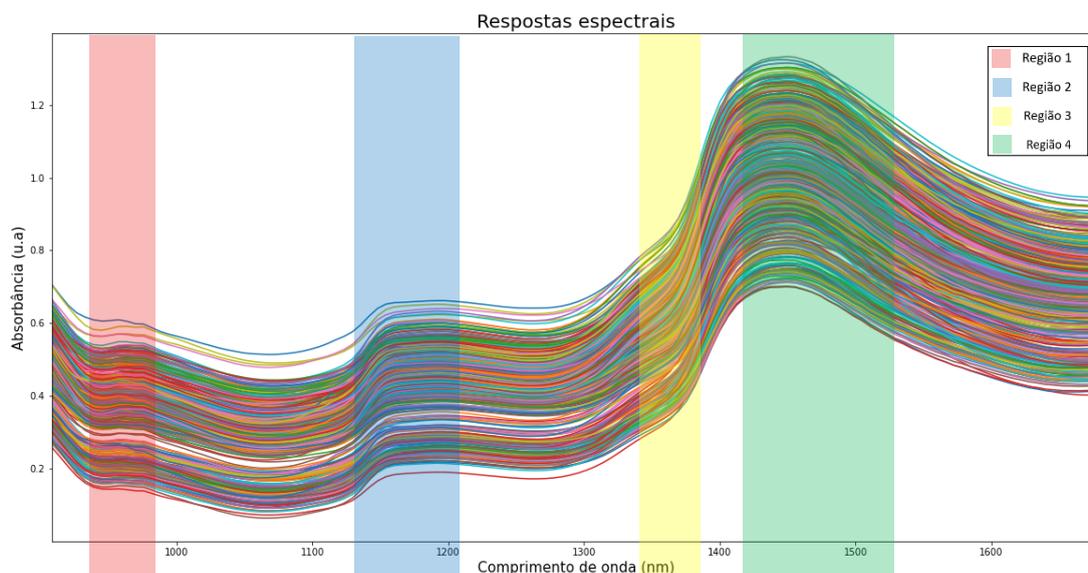
ZHAO, X. et al. Functional mapping of ontogeny in flowering plants. **Briefings in Bioinformatics**, v. 13, n. 3, p. 317–328, mai 2012.

ZIA, S. et al. Infrared Thermal Imaging as a Rapid Tool for Identifying Water-Stress Tolerant Maize Genotypes of Different Phenology. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 199, n. 2, p. 75–84, abr. 2013.

Zinselmeier et al. Reversing drought-induced losses in grain yield: sucrose maintains embryo growth in maize. **Crop Science**. v. 35 n. 5. p. 1390- 1400, set. 1995.

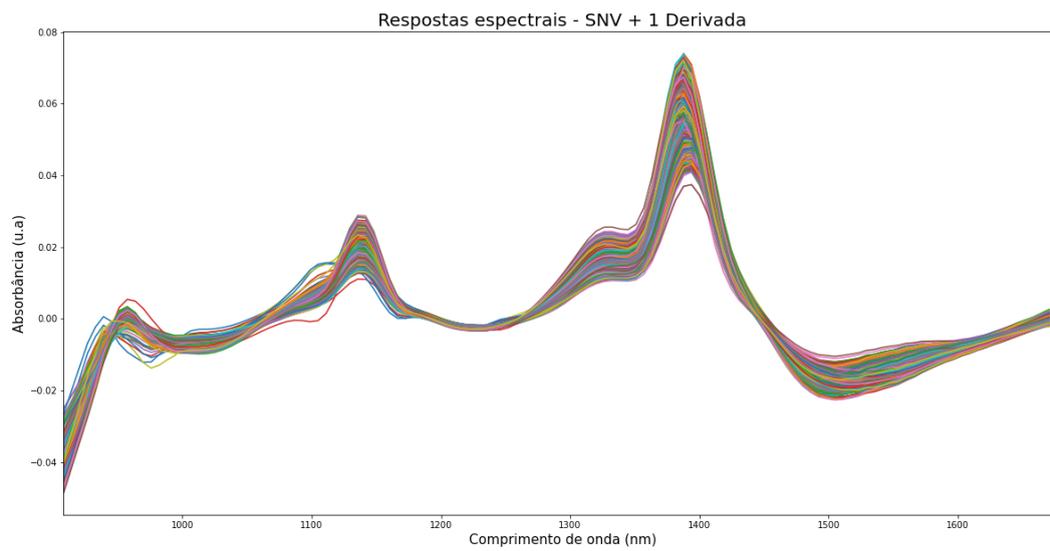
APÊNDICE

Apêndice A – Curva de padrão espectral do NIR



Espectros NIR das amostras de colmo de milho na região entre 908 a 1676 nm [a primeira região destacada, compreendida entre 950 a 970 nm por ligações C-H, CH₂ e CH₃; a segunda região, compreendida entre 1140 a 1200 nm revela a presença do grupo C-H; a terceira região, entre 1340 a 1360 nm, do grupo C-H; e as bandas mais intensas estão presentes na quarta região (1400 – 1500nm), características do grupo OH] (JAMSHIDI et al., 2012; SCHAARE et al., 2000).

Apêndice B – Curva de calibração após tratamentos de SNV + 1^a. derivada



Curva espectral pós suavização dos dados tratados por SNV e 1^a. derivada.