

MELHORAMENTO DE *Capsicum annuum* L. var. *annuum* PARA A
RESISTÊNCIA À ANTRACNOSE E APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE
REFLECTÂNCIA FOLIAR NA SELEÇÃO DE GENÓTIPOS
RESISTENTES

ROSIMARA BARBOZA BISPO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES -RJ
FEVEREIRO - 2024

MELHORAMENTO DE *Capsicum annuum* L. var. *annuum* PARA A
RESISTÊNCIA À ANTRACNOSE E APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE
REFLECTÂNCIA FOLIAR NA SELEÇÃO DE GENÓTIPOS
RESISTENTES

ROSIMARA BARBOZA BISPO

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutora em Genética e Melhoramento
de Plantas”.

Orientadora: Prof.^a Rosana Rodrigues

CAMPOS DOS GOYTACAZES-
RJ FEVEREIRO – 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

B622

Bispo, Rosimara Barboza.

Melhoramento de *Capsicum annuum* L. var. *annuum* para resistência à antracnose e aplicação dos índices de reflectância foliar na seleção de genótipos resistentes / Rosimara Barboza Bispo. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2024.

102 f. : il.

Bibliografia: 69 - 84.

Tese (Doutorado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2024.
Orientadora: Rosana Rodrigues.

1. pimentão. 2. *Colletotrichum scovillei*. 3. fenotipagem. 4. CI-710. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 631.5233

MELHORAMENTO DE *Capsicum annuum* L. var. *annuum* PARA A RESISTÊNCIA À ANTRACNOSE E APLICAÇÃO DOS ÍNDICES DE REFLECTÂNCIA FOLIAR NA SELEÇÃO DE GENÓTIPOS RESISTENTES

ROSIMARA BARBOZA BISPO

“Tese apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutora em Genética e Melhoramento de Plantas”.

Aprovada em 29 de fevereiro de 2024.

Comissão Examinadora:



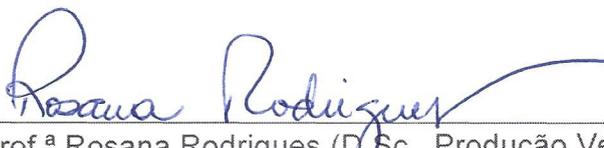
Prof.^a Monique Moreira Moulin (D.Sc., Genética e Melhoramento de Plantas) - IFES



Prof.^a Telma Nair Santana Pereira (Ph.D., Plant Breeding) - UENF



Prof. Messias Gonzaga Pereira (Ph.D., Plant Breeding) - UENF



Prof.^a Rosana Rodrigues (D.Sc., Produção Vegetal) - UENF
(Orientadora)

DEDICATÓRIA

Ao meu amado avô Luís José Barbosa (*in memoriam*)

Dedico.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro e ao Programa de Pós-graduação em Genética e Melhoramento de Plantas (PGMP), pela oportunidade concedida para realização do doutorado. E a todos os professores do PGMP pela contribuição dada para minha formação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do projeto de pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado sanduíche. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pela concessão da bolsa de doutorado.

À Professora Rosana Rodrigues, pelo exemplo de liderança e competência profissional, orientação, incentivo e suporte para realização da pesquisa.

Aos meus conselheiros e membros da comissão examinadora, professores Telma Nair Santana Pereira, Messias Gonzaga Pereira e Monique Moreira Moulin.

Ao secretário José Daniel, pelas instruções dadas para o cumprimento de assuntos burocráticos.

Ao time do Lab110, Cláudia Pombo, André, Sabrina, Fernando, Roberta, Anderson, Karina, Thâmara, Eduardo, Paula, Laila, Paola, Cláudia Lougon, Maria

do Socorro, Gaspar, Cleiton, Marcos, Marlon (*in memoriam*), e ao Marcos do Lab LCQUI pela ajuda na condução da pesquisa, troca de experiências e amizade.

Aos colegas Katherly, Daniele Mendes, Fernando, Catiane, Alex, Uéliton, José Gabriel, Samuel, Valter, Divino, Camila, entre outros, por terem entrado na minha vida e terem me proporcionado momentos memoráveis. Quem tem amigos tem tudo, a amizade é um dos melhores presentes de Deus.

A minha família, que sempre me apoiou, mesmo de longe, sempre me fazendo ser a pessoa mais abençoada do mundo.

As minhas irmãs Rosieli, Liliane e Marciele, por me mostrarem que mesmo com personalidades diferentes, cada uma sabe fazer o seu melhor com as condições disponíveis.

A minha querida irmã Rosimeire, aquela que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos da vida. Como sou grata a Deus por ter nascido com você e viver os mesmos sonhos em comum. Obrigada por cada segundo. Sempre te amarei.

A todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para este trabalho, deixo meu sincero agradecimento.

MUITO OBRIGADA!

SUMÁRIO

RESUMO	xii
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. Objetivo geral.....	4
2.2. Objetivos específicos.....	4
3. CAPÍTULOS	5
3.1. RESISTÊNCIA GENÉTICA Á ANTRACNOSE EM FRUTOS IMATUROS E MADUROS EM FAMÍLIAS F _{5:6} DE <i>Capsicum annuum</i> L. var. <i>annuum</i>	5
3.1.1. INTRODUÇÃO	5
3.1.2. REVISÃO DE LITERATURA	7
3.1.3. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1.4. RESULTADOS.....	24
3.1.5. DISCUSSÃO	36
3.1.6. CONCLUSÕES	39
3.2. SENSORES APLICADOS AO MELHORAMENTO DE PLANTAS: ÍNDICES DE REFLETÂNCIA FOLIAR (IRFs) E A RESISTÊNCIA À ANTRACNOSE EM <i>Capsicum annuum</i> L. var. <i>annuum</i>	40
3.2.1. INTRODUÇÃO	40
3.2.2. REVISÃO DE LITERATURA.....	42
3.2.3. MATERIAL E MÉTODOS	47

3.2.4. RESULTADOS.....	55
3.2.5. DISCUSSÃO.....	63
3.2.6. CONCLUSÕES.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Condições experimentais. A) preparo da área com mulching; B) Identificação e plantio das mudas; C) Capina, irrigação e tutoramento; D) Práticas de manejo da cultura; E e F) Estádios fenológicos; G) Colheita dos frutos para avaliação de resistência à antracnose e H) Desinfestação de frutos destacados pré-inoculação. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.....16
- Figura 2** -Valores diários de temperatura (°C) máxima, temperatura (°C) mínima, umidade relativa do ar (%) máxima, umidade relativa do ar mínima e precipitação (mm) observados durante os meses de maio a setembro de 2021. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.....17
- Figura 3** - Preparação da suspensão conidial e inoculação pelo método de infiltração. A- Cultivo *in vitro* de *Colletotrichum scovillei* (isolado UEL8.1U); B- Contagem dos conídios em câmara de Neubauer e microscópio óptico; C- Inoculação dos frutos de *Capsicum annuum* L. var. *annuum* com suspensão conidial pelo método de infiltração e D- Armazenamento dos frutos em câmara úmida. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.....19
- Figura 4** - Médias da área abaixo da curva do progresso da doença (AACPD) de frutos imaturos e maduros de 25 linhagens de *Capsicum annuum* L. var. *annuum* e o parentais resistente (R) e suscetível (S) inoculados com *Colletotrichum scovillei*. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.....28

Figura 5- Médias do período de incubação (PI) de frutos imaturos e maduros de 25 linhagens de <i>Capsicum annuum</i> L. var. <i>annuum</i> e o parentais resistente (R) e suscetível (S) inoculados com <i>Colletotrichum scovillei</i> . UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.....	29
Figura 6 - Médias do período de latência (PL) de frutos imaturos e maduros de 25 linhagens de <i>Capsicum annuum</i> L. var. <i>annuum</i> e o parentais resistente (R) e suscetível (S) inoculados com <i>Colletotrichum scovillei</i> . UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.....	30
Figura 7 - Médias do diâmetro médio do fruto (LMF) e comprimento médio do fruto (CMF) de 25 linhagens de <i>Capsicum annuum</i> L. var. <i>annuum</i> e os respectivos parentais. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.....	31
Figura 8 - Fenótipo do parental masculino (UENF 1381) resistente à antracnose em frutos imaturos e maduros (<i>C. annuum</i> L. var. <i>annuum</i>) avaliados por sete dias após a inoculação com <i>Colletotrichum scovillei</i> . UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.....	34
Figura 9 - Fenótipo do parental feminino (UENF 2285) suscetível à antracnose em frutos imaturos e maduros (<i>C. annuum</i> L. var. <i>annuum</i>) avaliados por sete dias após a inoculação com <i>Colletotrichum scovillei</i> . UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.....	35
Figura 10 -Fenótipo da família 313-17-9-2-2 selecionada para a resistência à antracnose em frutos imaturos e maduros (<i>C. annuum</i> L. var. <i>annuum</i>) avaliados por sete dias após a inoculação com <i>Colletotrichum scovillei</i> . UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.....	36
Figura 11 - Metodologias para avaliação dos índices de refletância foliar, características agronômicas e de resistência à antracnose em diferentes estádios fenológicos de <i>Capsicum annuum</i> L. <i>annuum</i> . UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.....	51
Figura 12 - Gráfico de dispersão de médias. A) PRI: índice de refletância fotoquímica; B) CNDVI: índice por diferença normalizada cumulativa e C) Ctr2: índice de Carter 2 de 25 linhagens de <i>Capsicum annuum</i> L. var. <i>annuum</i> e os respectivos parentais. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.....	57

Figura 13 - Coeficiente de determinação genotípico (H^2) dos IRFs para dados coletados entre 35 e 120 dias após o florescimento. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.....	58
Figura 14 - Gráfico Biplot da análise de componentes principais (PCA) utilizando 15 índices de refletância foliar (IRFs) obtidos a partir de seis avaliações de 25 linhagens de <i>C. annum</i> L. var. <i>annuum</i> , juntamente com seu progenitor resistente. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.....	59
Figura 15 - Correlações fenotípicas significativas ($p \leq 0,05$) entre 22 características avaliadas em 25 linhagens de <i>Capsicum annum</i> L. var. <i>annuum</i> e respectivos parentais utilizando dados da área abaixo da curva de progresso (AACP) dos índices de refletância foliar referentes a seis avaliações. Índices de refletância foliar: ARI1, ARI2, CRI1, CRI2, PRI, NDVI, CNDVI, G, TCARI, WBI, Ctr1, Ctr2, NPCI, FRI e SIPI. Características de resistência: AACPDFI, AACPDFM, PIFI, PIFM. Características agronômicas: PROD, PERIf e AREf. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.....	61
Figura 16 - Correlação fenotípica entre 22 características avaliadas em 25 linhagens de <i>C. annum</i> L. var. <i>annuum</i> e seus parentais utilizando dados de uma única avaliação realizada aos 120 DAF. Índices de reflectância foliar: ARI1, ARI2, CRI1, CRI2, PRI, NDVI, CNDVI, G, TCARI, WBI, Ctr1, Ctr2, NPCI, FRI e SIPI. Características de resistência: AACPDFI, AACPDFM, PIFI, PIFM. Características agronômicas: PROD, PERIf e AREf. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Linhagens F _{5:6} de <i>Capsicum annuum</i> L. var. <i>annuum</i> com as suas respectivas genealogias, níveis de pungência e classificação.....	15
Tabela 2 - Atributos químicos do solo da área experimental localizada na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro em Campos dos Goytacazes, na profundidade de 0 a 20 cm.....	18
Tabela 3 - Resumo da análise de variância individual para as variáveis agronômicas e de resistência e conjunta apenas para as variáveis de resistência de 25 famílias F _{5:6} de <i>Capsicum annuum</i> L. var. <i>annuum</i> e seus parentais.....	25
Tabela 4 - Estimativa dos componentes de variância e parâmetros genéticos para as variáveis de resistência à antracnose e características morfoagronômicas de frutos em 25 famílias F _{5:6} de <i>Capsicum annuum</i> L. var. <i>annuum</i> e os respectivos parentais.....	27
Tabela 5 - Estimativa dos ganhos genéticos com a seleção de dez famílias F _{5:6} de <i>C. annuum</i> L. var. <i>annuum</i> pelo índice de Mulamba e Mock (1978) considerando as características de resistência à antracnose e agronômicas.....	32
Tabela 6 - Classificação dos Índices de Refletância Foliar e suas respectivas equações e comprimentos de onda, utilizados no estudo da interação <i>Capsicum-Colletotrichum</i>	49

Tabela 7 - Resumo da ANOVA, abrangendo média, coeficiente de variação experimental e coeficiente de determinação genotípica relativos aos 15 índices de refletância foliar (IRFs) avaliados em 25 linhagens de *C. annuum* L. var. *annuum* e seus parentais.....56

RESUMO

BISPO, Rosimara Barboza; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; fevereiro, 2024; Melhoramento de *Capsicum annuum* L. var. *annuum* para a resistência à antracnose e aplicação dos índices de reflectância foliar na seleção de genótipos resistentes. Orientadora: Profa. Dra. Rosana Rodrigues; Conselheiros: Profa. Dra. Telma Nair Santana Pereira, Dra. Monique Moreira Moulin e Prof. Dr. Messias Gonzaga Pereira.

O Brasil tem se destacado globalmente como um dos maiores consumidores de agroquímicos e o pimentão está no topo da lista de produtos agrícolas com irregularidades associadas ao seu uso. A antracnose é uma das principais doenças pré e pós-colheita. O desenvolvimento de cultivares de pimenta e/ou pimentão resistentes à antracnose é um desafio para os melhoristas de *Capsicum*, devido à complexidade da herança da resistência. No entanto, essa abordagem é considerada a mais sustentável do ponto de vista ambiental, econômico e social. A metodologia tradicional utilizada para a avaliação de resistência à antracnose em frutos de *Capsicum* é por meio da escala de notas de severidade da doença e leva em consideração a subjetividade do avaliador. Desta forma, novas abordagens menos subjetivas de avaliação podem auxiliar na seleção de genótipos resistentes com alta acurácia e precisão. Este trabalho está dividido em dois capítulos, nos quais são abordadas metodologias para avaliação e seleção de famílias F_{5:6} resistentes à antracnose em frutos imaturos e maduros. O primeiro capítulo teve por objetivo avaliar e selecionar famílias F_{5:6} de *C. annuum* L. var. *annuum* quanto a resistência à antracnose e atributos agronômicos. Vinte e cinco famílias e seus parentais UENF 1381 (resistente) e UENF 2285 (suscetível), foram arranjos sob

o delineamento em blocos ao acaso, com três repetições e cinco plantas por parcela. Os frutos foram colhidos e desinfestados em laboratório e inoculados com suspensão na concentração de $1,0 \times 10^6$ conídios.mL⁻¹. As características avaliadas foram área abaixo da curva do progresso da doença - AACPD, período de incubação - PI e período de latência - PL. As características agronômicas avaliadas foram comprimento médio do fruto - CMF, diâmetro médio do fruto - DMF, espessura do pericarpo - EPF, massa total de fruto - MTF e massa média do fruto - MMF. Foram estimados os componentes de variância e parâmetros genéticos. O ganho de seleção foi realizado pelo índice de Mulamba e Mock. Não houve diferença significativa entre a AACPD de frutos imaturos e maduros. O teste Scott-Knott possibilitou a formação de dois grupos, um composto pelo parental UENF 1381 e as 25 linhagens, e o segundo grupo incluindo apenas o parental suscetível UENF 2285. Das 25 famílias avaliadas, dez foram selecionadas, obtendo ganhos negativos para a AACPD, e ganhos positivos para as características agronômicas. No segundo capítulo, foi reportado o desenvolvimento de um protocolo para a identificação de genótipos resistentes à antracnose em frutos de *Capsicum*, empregando índices de refletância foliar. Quinze IRFs foram estimados com o mini espectrômetro portátil de folhas CI-710. As avaliações abrangeram todo o crescimento da planta após o florescimento, no total foram realizadas seis avaliações com intervalos de 15 dias, iniciando aos 35 e finalizando aos 120 dias após o florescimento (DAF). Além disso, foram utilizadas características de resistência PI, PL e AACPD de frutos imaturos e maduros e características agronômicas, tais como produtividade, e perímetro e área do fruto pelo *Tomato Analyzer*. Foram realizadas as análises de variância individual, parcelas subdivididas, componentes principais e correlação de Pearson. As avaliações dos IRFs aos 120 dias após o florescimento foram as que melhor explicaram a variabilidade genética entre os genótipos em comparação com os estádios iniciais e tiveram maiores valores de coeficiente de determinação genotípico. Os índices de refletância fotoquímica (PRI), de vegetação por diferença normalizada cumulativa (CNDVI) e de Carter 2 (Ctr2) destacaram-se como eficazes na distinção entre os genótipos resistentes e o parental suscetível. A análise de PCA e a correlação de Pearson permitiram identificar associações positivas e negativas entre os diferentes grupos de características. Tanto a AACPD dos IRFs quanto a utilização dos dados coletados aos 120 DAF com o mini espectrômetro mostraram-

se estratégias úteis no programa de melhoramento de *C. annuum* L. var. *annuum* visando resistência à antracnose, resultando em uma metodologia não destrutiva para acelerar as etapas de seleção.

Palavras-chave: pimentão, *Colletotrichum scovillei*; fenotipagem; CI-710

ABSTRACT

BISPO, Rosimara Barboza; D.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; February 2024; Breeder of *Capsicum annuum* L. var. *annuum* for resistance to anthracnose and application of leaf reflectance indices in the selection of resistant genotypes Advisor: Profa. Rosana Rodrigues; Committee members: Profa. Telma Nair Santana Pereira, Monique Moreira Moulin e Prof. Messias Gonzaga Pereira.

Brazil has stood out globally as one of the largest consumers of pesticides, and bell peppers are at the top of the list of agricultural products with irregularities associated with pesticide use. Anthracnose is one of the main pre and post-harvest diseases. Developing pepper and/or bell pepper cultivars resistant to anthracnose is a challenge for *Capsicum* breeders due to the complexity of resistance inheritance. However, this approach is considered the most environmentally, economically, and socially sustainable. The traditional methodology used for evaluating anthracnose resistance in *Capsicum* fruits is through the disease severity rating scale, considering the evaluator's subjectivity. Thus, new less subjective evaluation approaches can assist in selecting resistant genotypes with high accuracy and precision. This work is divided into two chapters, addressing methodologies for evaluating and selecting $F_{5:6}$ families resistant to anthracnose in immature and mature fruits. The first chapter aimed to evaluate and select $F_{5:6}$ families of *C. annuum* L. var. *annuum* for anthracnose resistance and agronomic traits. Twenty-five families and their parents UENF 1381 (resistant) and UENF 2285 (susceptible) were arranged in a randomized complete block design, with three replications and five plants per plot. The fruits were harvested, disinfested in the laboratory, and

inoculated with a suspension at a concentration of 1.0×10^6 conidia/mL⁻¹. The evaluated characteristics were area under the disease progress curve (AUDPC), incubation period (IP), and latency period (LP). The agronomic characteristics evaluated were average fruit length (AFL), average fruit diameter (AFD), pericarp thickness (PT), total fruit mass (TFM), and average fruit mass (AFM). Variance components and genetic parameters were estimated. Selection gain was performed using the Mulamba and Mock index. There was no significant difference between AUDPC of immature and mature fruits. The Scott-Knott test allowed the formation of two groups, one composed of the parent UENF 1381 and the 25 lines, and the second group including only the susceptible parent UENF 2285. Out of the 25 evaluated families, ten were selected, obtaining negative gains for AUDPC and positive gains for agronomic characteristics. In the second chapter, a protocol for identifying anthracnose-resistant genotypes in *Capsicum* fruits using leaf reflectance indices was developed. Fifteen LRIs were estimated with the CI-710 handheld leaf spectrometer. Evaluations covered the entire plant growth after flowering, with a total of six evaluations at 15-day intervals, starting at 35 and ending at 120 days after flowering (DAF). Additionally, resistance characteristics IP, LP, and AUDPC of immature and mature fruits and agronomic characteristics, such as productivity, and fruit perimeter and area by the Tomato Analyzer were used. Individual variance, split-plot, principal component, and Pearson correlation analyses were performed. Evaluations of LRI at 120 DAF best explained the genetic variability among genotypes compared to initial stages and had higher genotypic determination coefficient values. Photochemical reflectance indices (PRI), normalized difference vegetation index (NDVI), and Carter 2 (Ctr2) stood out as effective in distinguishing between resistant genotypes and susceptible parent. PCA and Pearson correlation analysis identified positive and negative associations between different groups of characteristics. Both the area under the LRIs progress curve and the use of data collected at 120 DAF with the mini spectrometer proved to be useful strategies in the *C. annuum* L. var *annuum* breeding program aiming for resistance to anthracnose, resulting in a non-destructive methodology to accelerate the selection steps.

Keywords: bell pepper; *Colletotrichum scovillei*; phenotyping; CI-710

1. INTRODUÇÃO

O gênero *Capsicum* pertence à família Solanaceae. Este gênero se destaca pela sua importância econômica e comercial, devido às pimentas e pimentões serem amplamente utilizados nos setores alimentício, ornamental e medicinal (Silvar e García-González, 2017). Contudo, neste gênero, é possível observar a ocorrência de várias doenças causadas por vírus, bactérias, nematoides e fungos (Gonçalves et al., 2014; Silva et al., 2014; Kenyon et al., 2014; Silva et al., 2017; Barka et al., 2020). Entre as doenças mais importantes para o cultivo de *Capsicum*, destaca-se a causada pelo fungo *Colletotrichum*, denominada antracnose. A presença dessa doença pode resultar em perdas consideráveis para as culturas de pimentão e pimenta nos períodos pré e pós-colheita, levando a sérios prejuízos econômicos (Kim, et al., 2008; Töfoli et al., 2015). A antracnose representa, assim, um desafio importante a ser enfrentado no manejo e na produção dessas culturas.

De acordo com o último relatório do Programa de Análise de Resíduos de Agrotóxicos em Alimentos (PARA) da ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária), divulgado em dezembro de 2023, o pimentão está entre as hortaliças não folhosas que mais apresentou irregularidades associadas ao uso de agrotóxicos. Ao longo das últimas duas décadas, a maioria das amostras de pimentão testadas pela ANVISA apresentou níveis residuais de pesticidas superiores aos limites máximos permitidos, sendo encontrado elevado número de pesticidas não autorizados para uso na cultura. Neste último relatório, 70% das amostras analisadas foram consideradas insatisfatórias e 82% destas, apresentaram agrotóxicos não permitido para a cultura, como o acefato, procimidona e profenofós (ANVISA, 2023). Esses resultados são um alerta para

outras problemáticas, sendo uma delas a constatação de que os produtores no Brasil enfrentam não apenas a falta de suporte fitossanitário adequado para a cultura do pimentão, mas também a escassez de cultivares resistentes e/ou tolerantes aos estresses bióticos. Essa conjuntura destaca a urgência de abordagens integradas e estratégias mais sustentáveis no manejo do pimentão no contexto agrícola brasileiro.

Adicionalmente, a escassez de recursos naturais e o aumento da população mundial têm impactado diretamente nos programas de melhoramento vegetal. O termo sustentabilidade tem ganhado destaque neste século, sendo uma preocupação central tanto em instituições públicas quanto privadas. Essa crescente ênfase na sustentabilidade reflete a necessidade urgente de abordagens agrícolas que sejam ecologicamente equilibradas, economicamente viáveis e socialmente responsáveis. O desenvolvimento de cultivares mais resilientes e adaptadas não apenas contribui para a segurança alimentar, mas também promove a conservação dos recursos naturais e a redução da dependência de práticas agrícolas intensivas em insumos químicos. Esse enfoque sustentável é crucial para enfrentar os desafios atuais e futuros na agricultura.

Ademais, para os melhoristas que trabalham com a espécie *Capsicum annuum*, os desafios são ainda maiores devido à ampla diversidade de doenças que afetam essa espécie. O desenvolvimento de cultivares de pimenta e/ou pimentão (*C. annuum*) resistentes a doenças tem sido um desafio para as equipes de melhoramento em todo o mundo, especialmente à antracnose em frutos. Os principais obstáculos para obter uma cultivar resistente incluem a escassez de germoplasma com resistentes, a complexidade da herança genética da resistência, a interação entre a planta e o patógeno, e o estágio de desenvolvimento do fruto (Mongkolporn et al., 2010). Quatro fontes de resistência em *C. annuum* têm sido descritas: 'Daepoong-cho', 'Chungryong', UENF 1381 (GBUEL 104) e L83-168 (Lin et al., 2002; Araújo et al., 2023). No entanto, a última fonte mencionada, L83-168, que havia sido relatada como resistente a diferentes espécies de *Colletotrichum*, teve sua resistência quebrada oito anos depois, tornando-se altamente suscetível aos isolados de *C. capsici*, *C. gloeosporioides* e *C. acutatum* (Mongkolporn et al., 2010).

O genótipo UENF 1381, utilizado neste estudo, além de ser resistente à antracnose e à mancha bacteriana em frutos imaturos, demonstrou moderada resistência ao mosaico amarelo do pimentão e à antracnose em frutos maduros (Bento et al., 2017). A herança da resistência do genótipo UENF 1381 ao *Colletotrichum scovillei* é quantitativa, expressando-se independentemente nos

diferentes estádios de maturação do fruto. Essa resistência é governada por dois genes principais, possivelmente diferentes, com efeito poligênico associado (Giacomin et al., 2020).

O desenvolvimento de uma cultivar de pimentão resistente à antracnose causada pelo *C. scovillei* requer um investimento considerável de tempo, recursos e mão de obra, sendo ainda mais desafiador devido à natureza destrutiva e laboriosa do método de avaliação. Diante desse cenário, torna-se imprescindível explorar e incorporar outras abordagens de avaliação que possam acelerar significativamente o processo de identificação de genótipos, proporcionando maior eficiência e precisão. Uma dessas abordagens é a fenotipagem de alta precisão, que tem se tornado um componente importante para o monitoramento das culturas, especialmente aprimorando a acurácia e precisão nas análises. Sensores multiespectrais têm demonstrado inúmeras aplicações na agricultura, abrangendo desde a previsão de produtividade até a detecção de estresse e controle de doenças em diversas condições de crescimento e ambientes (Gracia-Romero et al., 2018). Essa tecnologia emergente oferece uma ferramenta valiosa para otimizar o processo de seleção de genótipos resistentes de maneira mais eficiente e, assim, contribuir para o avanço no melhoramento genético de plantas.

Este trabalho está estruturado em dois capítulos. O primeiro capítulo aborda a avaliação e seleção das famílias F_{5:6} obtidas pelo método genealógico em relação à resistência à antracnose causada pelo *C. scovillei* em frutos imaturos e maduros, utilizando uma escala de nota tradicional para a avaliação de resistência à antracnose. O segundo capítulo trata do desenvolvimento de um protocolo para a avaliação de índices de reflectância foliar, e elucidação dos IRFs mais promissores na identificação de progênies resistentes à antracnose. Essa divisão estratégica permite uma abordagem abrangente, englobando tanto a avaliação direta da resistência em frutos quanto a exploração de métodos mais avançados, como também a análise de reflectância foliar, para aprimorar o processo de seleção.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar e selecionar famílias $F_{5:6}$ de pimenta e pimentão (*Capsicum annuum* L. var. *annuum*) do programa de melhoramento genético para resistência à antracnose (*C. scovillei*) para obtenção de cultivares do tipo linha pura e desenvolver um protocolo para seleção de genótipos resistentes por meio dos índices de refletância foliar (IRFs)

2.2. Objetivos específicos

- I. Fenotipar famílias $F_{5:6}$ quanto à reação à antracnose em frutos imaturos e maduros;
- II. Fenotipar famílias $F_{5:6}$ quanto a características agronômicas;
- III. Fenotipar fisiologicamente famílias $F_{5:6}$ utilizando índices de refletância foliar;
- IV. Identificar os IRFs promissores que possam ser utilizados para distinguir genótipos resistentes à antracnose em frutos;
- V. Investigar a relação entre características agronômicas, IRFs e de resistência à antracnose;
- VI. Desenvolver um protocolo simples e eficiente para avaliação e análise dos IRFs na espécie *C. annuum*;

3. CAPÍTULOS

3.1. RESISTÊNCIA GENÉTICA Á ANTRACNOSE EM FRUTOS IMATUROS E MADUROS EM FAMÍLIAS F_{5:6} DE *Capsicum annuum* L. var. *annuum*

3.1.1. INTRODUÇÃO

As pimentas e pimentões do gênero *Capsicum* são amplamente apreciados em todo o mundo devido a sua ampla variedade de cores, formas e sabores de frutas. O cultivo de plantas desse gênero no Brasil está disseminado em diferentes regiões, impulsionado pelo baixo custo de produção por hectare em comparação a outras culturas (Rêgo et al., 2011). Essa popularidade e adaptabilidade fazem com que as pimentas e pimentões sejam elementos proeminentes na culinária brasileira, além de serem apreciados em diversas partes do mundo, contribuindo significativamente para a diversidade gastronômica e econômica (Baba et al., 2016; Garcia et al., 2016).

Todavia, a ocorrência de doenças nas pimentas e pimentões causa perdas expressivas na produção, principalmente, quando a doença acomete os frutos, acarretando a redução da qualidade e quantidade. Entre as principais doenças com essas características está a antracnose. Esta é causada por espécies do gênero *Colletotrichum*. Além de ser uma das doenças mais destrutivas para as plantas do

gênero *Capsicum*, a antracnose é de grande importância em várias outras espécies de valor comercial (Than et al., 2008). Os danos provocados pelo patógeno reduzem o valor comercial do produto ou torna-o impróprio para o mercado e consumo humano (Liu et al., 2016; Saxena et al., 2016). No Brasil, tem sido relatadas perdas de até 100% em lavouras com cultivares de pimentão e pimenta altamente suscetíveis (Reis et al., 2009; Pereira et al., 2016). O manejo eficaz da antracnose é, portanto, essencial para garantir a sustentabilidade e a rentabilidade da produção de pimentas e pimentões.

O uso de cultivares resistentes é considerado o método de controle mais efetivo em muitos patossistemas, pois apresenta uma série de vantagens em relação às demais opções de controle, especialmente nos aspectos econômicos, práticos e sustentável (Park et al., 2012; Than et al., 2008; Töfoli et al., 2015). Embora ainda não exista nenhuma cultivar de pimentão resistente à antracnose, algumas fontes de resistência já foram identificadas, e estudos evidenciaram que o controle da resistência se expressa de forma independente nos estádios de desenvolvimento do fruto (Mahasuk et al., 2009a; Mahasuk et al., 2009b; Pakdeeveraporn et al., 2005).

Uma das fontes de resistência à antracnose é o acesso UENF 1381, uma pimenta da espécie *C. annuum* pertencente ao banco de germoplasma de *Capsicum* da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF). Além de ser resistente à antracnose em frutos imaturos e maduros, o acesso também demonstra resistência à mancha bacteriana em frutos imaturos e é moderadamente resistente ao mosaico amarelo (Bento et al., 2017). O programa de melhoramento dessa instituição tem desenvolvido pesquisas em diversas áreas, como a identificação de fontes de resistência a doenças (Bento et al., 2017), incluindo a antracnose (Silva et al., 2014). Além disso, o programa atua na proteção e registro de cultivares resistentes (Cassaró, 2022; Pimenta et al., 2016) e no mapeamento genético (Bianchi, 2021; Moulin et al., 2015).

O sucesso de um programa de melhoramento se deve, especialmente, ao método de melhoramento adotado, por exemplo, em espécies autógamas, a adoção de método de populações segregantes que possibilita aproveitar adequadamente a variabilidade genética ao longo das gerações de avanço das progênies (Nunes et al., 2008). O programa de melhoramento para a resistência à antracnose da UENF iniciou em 2014 a partir do cruzamento do acesso UENF 2285, um pimentão utilizado como parental feminino e o acesso UENF 1381, uma pimenta utilizada como parental masculino, ambos da espécie *C. annuum*. As gerações foram avançadas pelo método genealógico.

O objetivo deste trabalho consistiu em avaliar e selecionar famílias $F_{5.6}$ de *C. annuum* quanto à resistência à antracnose causada por *C. scovillei* e atributos agronômicos para obtenção de cultivares do tipo linha pura.

3.1.2. REVISÃO DE LITERATURA

3.1.2.1. Gênero *Capsicum* L.

As plantas do gênero *Capsicum* pertencem à família Solanaceae e engloba as pimentas e pimentões. Este gênero é um dos mais importantes economicamente das Solanaceae e compreende aproximadamente 43 espécies (Barboza et al., 2022) sendo apenas cinco domesticadas: *C. annuum*, *C. baccatum*, *C. chinense*, *C. frutescens* e *C. pubescens* (Zimmer et al., 2011). O gênero é nativo do hemisfério ocidental sendo que os povos Astecas, Incas e Maias foram os primeiros a iniciarem a sua domesticação, utilizando-as em cerimônias religiosas, em suas dietas e como ornamentação ao redor de suas moradias (Bosland e Votava, 2012).

Atualmente o gênero é mundialmente difundido, isso se deve, principalmente, ao período de explorações marítimas realizadas no século XIV e XV por Cristóvão Colombo e a partir daí as principais civilizações começaram a consumir e cultivá-las, pois as plantas são capazes de se adaptarem e serem domesticadas em diferentes condições ambientais devido ao processo de hibridação (Stommel e Bosland, 2007). Sua rápida popularidade se deu em decorrência de suas propriedades peculiares, tais como variedade de pigmentos, e diferentes graus de pungência e sabor. Devido aos seus atributos químicos as pimentas têm atraído muitos pesquisadores para estudar tais propriedades (Zimmer et al., 2012; Yang et al., 2013; Cherene et al., 2023).

As espécies que compõem o gênero *Capsicum* são diploides e são divididas em dois grupos de acordo com o número de cromossomos. O primeiro grupo compreende principalmente as espécies cultivadas com 24 cromossomos ($n = x = 12$) e o segundo engloba algumas espécies silvestres com 26 cromossomos ($n = x = 13$) (Tong e Bosland, 2003). Baseado no cruzamento entre as espécies, também podem ser classificadas em três complexos (Tong e Bosland, 1999; Ince et al., 2010). O complexo *C. annuum* compreende as espécies *C. annuum*, *C. chinense* e

C. frutescens, além do *C. chacoense* e *C. galapagoense*. Já o complexo *C. baccatum* contém a espécie *C. baccatum*. (variedades *baccatum*, *pendulum* e *praetermissum*) e *C. tovarii*. O complexo *C. pubescens*, o mais isolado dos grupos três grupos contém a espécies *C. pubescens*, *C. cardenassi* e *C. eximium* (Stommel e Bosland, 2007).

A flor é o principal órgão para identificação e classificação das espécies. A morfologia, a cor, a constrição do cálice e o número de flores por nó estão entre os principais descritores taxonômicos (Ince et al., 2010). Espécies com flores brancas incluem as espécies domesticadas *C. annuum*, *C. baccatum*, *C. chinense* e *C. frutescens* e espécies silvestres como *C. chacoense* e *C. galapagoense*, enquanto a espécie domesticada *C. pubescens* e algumas espécies silvestres tais como *C. eximium*, *C. cardenasil* e *C. tovarii* possuem flores roxas (Onus e Pickersgill, 2004; Barboza et al., 2022). As flores são hermafroditas, facilitando a autofecundação. Contudo, cruzamentos são possíveis entre espécies do mesmo complexo, embora às vezes com dificuldade. A polinização cruzada natural varia dependendo da espécie, localização geográfica, condições climáticas, agentes polinizadores e espaçamento entre as plantas (Tanksley, 1984; Justino, 2018). Há relato que a espécie *C. annuum* possui taxa de cruzamento natural variando entre 1,2 e 10,8% e essa alta taxa de polinização cruzada sugere um comportamento de autógama facultativa (Justino et al., 2018).

A ampla variabilidade encontrada nos frutos de *C. annuum*, como cor, formato, tamanho, sabor, pungência e uso, coloca a espécie como a mais amplamente cultivada e de maior importância econômica entre as espécies domesticadas. Sua importância se dá pela combinação de seu sabor, cor e valor nutricional. A forma cultivada da espécie é denotada como *C. annuum* L. var. *annuum* (Stummel e Bosland, 2007), e devido a sua importância é a cultivar comercial mais utilizada em programas de melhoramento genético (Gonzalez-Perez et al., 2014).

3.1.2.2. Importância econômica da pimenta e pimentão

De acordo com o último censo agropecuário realizado em 2017, o Brasil registrou uma produção de cerca de 224,3 mil toneladas de pimentão, sendo as regiões Sudeste e Nordeste as principais produtoras. Para a cultura da pimenta, a

produção foi significativamente menor, com cerca de 28,3 mil toneladas produzidas. Em relação às regiões mais produtoras, a ordem se inverte quando comparada com a cultura do pimentão, já que a região Nordeste sobressaiu a região Sudeste (IBGE, 2023).

Tradicionalmente, as pimentas e pimentões são usados na culinária, no entanto têm sido cada vez mais utilizados para fins ornamentais, bem como nas indústrias alimentícia e farmacêutica. Substâncias como a capsaicina, presente na placenta das pimentas, têm sido aplicadas em diversos tratamentos. A identificação e quantificação dos níveis de capsaicina e seus análogos têm sido recentemente estudadas, em decorrência de suas propriedades analgésicas, antioxidantes, anti-inflamatórias e anticancerígena (Chapa-Oliver e Mejía-Teniente, 2016; El-kott e Bin-Meferij, 2018).

A capsaicina é um composto químico presente nas pimentas e responsável por causar ardor e calor. Essas sensações, são em decorrência de um receptor sensível a capsaicina o vaniloide de potencial transitório subtipo 1 (TRPV1). Recentemente, a capsaicina foi objeto de estudo em duas pesquisas, ambas com um objeto em comum: a interação do sistema nervoso com estímulos de toque e temperatura nas extremidades nervosas da pele. As duas pesquisas receberam o Prêmio Nobel de Medicina em 2021, pois ajudaram a responder a uma pergunta que tem intrigado pesquisadores e médicos de todo o mundo: como experimentamos e sentimos o mundo ao nosso redor? Essas pesquisas são promissoras para o entendimento e prevenção de diversos tipos de dores crônicas, cujo tratamento ainda é um desafio para a medicina (Nobel Prizes, 2021). Outra substância que tem contribuído com pesquisas na área da medicina é a apigenina, um flavonoide presente nas pimentas e pimentões, e suas propriedades têm se mostrado capazes de adiar a progressão de doenças associadas à baixa formação de neurônios, como Parkinson e Alzheimer (Souza et al., 2015; Thuphairo et al., 2019).

Os múltiplos usos e as novas demandas do mercado consumidor, têm impulsionado o desenvolvimento de novas cultivares com características específicas. Contudo, constitui um desafio para os melhoristas de *Capsicum*, especialmente no que diz respeito à criação de cultivares com excelentes atributos agronômicos e resistentes a doenças. Nesse gênero, é possível observar a ocorrência de inúmeras doenças causadas por vírus, bactérias e fungos (Bento et

al., 2017). Entre as mais importantes para o cultivo de pimentas e pimentões, destaca-se a antracnose, causada por fungos do gênero *Colletotrichum*, que gera danos consideráveis à cultura desde o plantio até a pós-colheita, causando sérios prejuízos econômicos para os produtores e estendendo-se aos consumidores (Kim et al., 2008). O desenvolvimento de cultivares resistentes a doenças como a antracnose é crucial para garantir a sustentabilidade e a produtividade dessas culturas.

3.1.2.3. Melhoramento para resistência à antracnose em *Capsicum annum* – UENF

O desenvolvimento de uma cultivar resistente contribui para a redução do uso de agroquímicos, que podem ser nocivos à saúde do produtor, bem como para a diminuição dos custos com mão de obra no controle da doença (Agrios, 2005). É comum nos programas de melhoramento de *Capsicum* a realização de hibridação intraespecífica com a finalidade de introduzir gene(s) de resistência(s) a doenças ou outra característica específica de interesse. Nesse caso, o cruzamento é realizado manualmente, com a emasculação da flor feminina na pré-antese e polinização com o pólen fresco coletado e armazenado anteriormente. O pólen pode ser armazenado por até dois meses em cápsula de gelatina em frasco com sílica gel a uma temperatura de 5 °C (Araújo et al., 2023).

Dentre as doenças fúngicas que acomete a espécie *C. annum*, a antracnose assume um papel de destaque em escala mundial, devido a ampla abrangência da doença e os severos prejuízos à produtividade da cultura. Com o intuito de contornar esse problema, a Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) desenvolveu o programa de melhoramento para resistência a antracnose. Quando o programa se iniciou em 2014 não existia nenhuma cultivar resistente à antracnose registrada no MAPA e disponível para uso agrícola no mercado. Porém, em novembro de 2019 uma nova cultivar de pimenta Biquinho, *C. chinense*, com resistência à antracnose causada pelo *Colletotrichum gloeosporioides*, foi lançada para uso comercial pela Feltrin, denominada Maria Bonita (Feltrin, 2024). Todavia, ainda não existe uma cultivar de pimentão resistente à antracnose. Vale ressaltar que a espécie prevalente no Brasil é a *C. scovillei* (Giacomin et al., 2021).

Inicialmente, o primeiro trabalho do programa de melhoramento teve por objetivo determinar a herança da reação à antracnose por meio da obtenção e avaliação das progênies F₁, F₂, RC₁ e RC₂. As gerações foram obtidas pelo cruzamento entre e o acesso UENF 2285 (pimentão), variedade altamente suscetível à antracnose e com bons atributos agronômicos, e a pimenta UENF 1381, resistente à antracnose, utilizado como parental masculino, ambos os acessos da espécie *C. annuum* var. *annuum* (Geronimo, 2018). Neste estudo, a taxa de segregação na geração F₂ foi de 3:1, indicando que a resistência é controlada por um gene dominante. A estimativa do grau médio de dominância indicou que a ação gênica controlando o caráter é de dominância parcial com pelo menos seis genes de efeito menor, levando a hipótese de dominância parcial com efeito poligênico para o controle de resistência à antracnose em frutos imaturos (Geronimo, 2018). Genes com efeitos menores têm uma influência relativamente pequena sobre um determinado traço ou característica, porém podem desempenhar um papel importante em características complexas, sua combinação com outros genes e fatores podem resultar em variações observáveis nos fenótipos de uma população (González et al., 2012).

Em outro estudo de herança para resistência à antracnose, o acesso UENF 1381 foi doado para a Universidade Estadual de Londrina e identificado como GBUEL104, porém ele foi utilizado como parental feminino, e os resultados indicaram que a herança da resistência ao *C. scovillei* é expressa independentemente nos diferentes estádios fenológicos do fruto (imaturo e maduro) havendo, para ambos os casos, dois genes de efeito maior responsáveis pela resistência, possivelmente diferentes e com efeitos poligênicos associados. O controle genético e seu aspecto quantitativo têm o maior efeito expresso em dominância parcial em frutos imaturos e dominância total em frutos maduros (Giacomin et al., 2020). Os trabalhos subsequentes objetivaram a avaliação e seleção de linhas recombinantes de pimenta e pimentão pelo método genealógico ou pedigree (Araújo 2020; Alencar 2022).

3.1.2.4. Patossistema *Capsicum* – *Colletotrichum* spp.

A antracnose é uma doença de distribuição cosmopolita, causada por várias espécies do gênero *Colletotrichum* Corda. Quatorze complexos de espécies de *Colletotrichum* são conhecidos, sendo que três deles são responsáveis por causar

doenças em *Capsicum* (*C. acutatum*, *C. truncatum* e *C. gloeosporioides*), com um total de 29 espécies de ocorrência natural. Entre essas espécies, três se destacam como as principais causadoras de prejuízos às lavouras: *C. scovillei*, *C. truncatum* e *C. siamense* (Araújo et al., 2023; Liu et al., 2016; Mongkolporn e Taylor, 2018). No Brasil, a prevalência é da espécie *C. scovillei* (Giacomin et al., 2021). A espécie também tem prevalência na Ásia, sendo responsável por causar graves reações em frutos de *C. annuum* por diferentes isolados (De Silva et al., 2019).

Estudos de patogenicidade evidenciaram que as espécies de *Colletotrichum* podem causar infecção diferenciada, dependendo do estágio de maturação do fruto. Por exemplo, frutos de pimenta maduros são normalmente infectados por *C. truncatum*, enquanto *C. acutatum* e *C. gloeosporioides* são mais comumente encontrados como patógenos de ambos os estádios de maturação do fruto (Harp et al., 2014).

A espécie *C. scovillei* pode causar danos em todas as fases de desenvolvimento do fruto (Giacomin et al., 2019). No entanto, as ocorrências são mais comuns no pós-colheita, uma vez que esse patógeno apresenta quiescência (Ali et al., 2016). Isolados de *C. scovillei* já foram caracterizados via reação diferencial em frutos imaturos, e provocaram diferentes reações, o que permite uma proposição preliminar de uma série diferenciadora para ambos os estádios de maturação do fruto em diferentes espécies de *Capsicum* (*C. annuum*, *C. chinense*, *C. baccatum* e *C. frutescens*) (Geronimo, 2018).

Os sintomas típicos da antracnose são lesões necróticas e depressivas, circulares ou angulares, com anéis concêntricos de acérvulos frequentemente encharcados, e produção de massa conidial de coloração salmão (Than et al., 2008). Para a germinação de conídios e formação de apressórios o fungo necessita de água livre ou umidade relativa do ar acima de 95% e temperatura entre 20 e 30 °C. Nas estações de seca, o patógeno fica inativo, estabelecendo o modo de infecção hemibiotrófico, onde as fases biotrófica e necrotrófica ocorrem sequencialmente (Sahitya et al., 2014). Após a infecção dos frutos, os esporos são facilmente removidos pela chuva e por irrigações por aspersão, que por meio de respingos associados ao vento, promovem a dispersão do patógeno por toda a lavoura. No Brasil, perdas de até 100% têm sido relatadas em cultivares altamente suscetíveis de pimentão em condições de campo (Reis et al., 2006; Pereira et al., 2016).

O uso de cultivares resistentes é o método mais econômico, sustentável e ambientalmente correto (Park et al., 2012; Sun et al., 2015). No entanto, a herança e o controle genético para resistência à antracnose são bastante complexos, variando com a espécie do patógeno e o estágio de desenvolvimento do fruto. Esses estudos são fundamentais para o conhecimento da herança da resistência e para o sucesso do programa de melhoramento. A literatura reporta a existência de doze genes que conferem resistência à antracnose em diferentes espécies de *Capsicum*, sendo que oito são dominantes e quatro recessivos (Araújo et al., 2023). Cinco genes foram identificados como *co1*, *co2*, *co3*, *co4* e *Co5* (Pakdeevaporn et al., 2005; Mahasuk et al., 2009a). A serie dominante: *Arn1*, *Arn2*, *Arn3*, *Arn4* e *Arn5* (Wang e Bosland, 2006). O gene *RCt1* de uma variedade local de pimenta Cayenne (Mishra et al., 2019) e um gene candidato *CAO5g17730* (Zhao et al., 2020).

3.1.2.5. Método genealógico ou pedigree

O método genealógico ou pedigree é um método de condução de populações segregantes, frequentemente utilizado no melhoramento de espécies autógamas para a obtenção de linhagens (Borém et al., 2017). Seu objetivo é combinar, em um mesmo genótipo, genes desejáveis que se encontram em dois ou mais genótipos diferentes (Allard, 1971).

A seleção é realizada para tipos superiores na população segregante F_2 , nas melhores progênies F_3 e nas melhores progênies das famílias selecionadas a partir da geração F_4 . A seleção de uma única planta dentro da família é frequentemente praticada até a geração F_5 ou F_6 quando a variação dentro de família é mínima e a seleção entre famílias se torna mais eficiente, a partir daí são extraídas as linhagens. Uma das principais características desse método é o registro genealógico de todas as relações entre os genitores e as progênies, já que essas informações são fundamentais para o melhoramento de linhagens, tornando possível decidir com quais famílias avançar e quais descartar (Borém et al., 2017). O registro se inicia com a numeração de cada planta F_2 selecionada. Cada seleção individual dentro de uma progênie $F_{2:3}$ recebe um número que é acondicionado à designação daquela progênie. Este procedimento é repetido durante as gerações seguintes até a geração anterior a do ensaio preliminar de rendimento (EPL).

O método genealógico é utilizado em diferentes culturas, sendo, principalmente, implementado no melhoramento de espécies autógamas, como: soja, pimenta e pimentão. O método tem demonstrado êxito para o melhoramento de inúmeros caracteres como resistência, produtividade, entre outras características agrônômicas (Oliveira, 2013). Uma de suas principais vantagens é que permite ao melhorista utilizar suas habilidades com um maior grau do que com outros métodos frequentemente utilizados em espécies autógamas. Contudo, uma das suas limitações é em relação à quantidade do material genético que o melhorista deve conduzir. Essas limitações podem ser reduzidas até certo ponto, iniciando-se diferentes cruzamentos em anos diferentes, escalonando-se, assim, os períodos em que ocorre o máximo de trabalho (Allard, 1971).

3.1.3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1.3.1. Condições experimentais, condução e avaliação da geração $F_{5:6}$

O ensaio foi conduzido no campo experimental da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, situado na cidade de Campos dos Goytacazes, ao norte do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, a 21° 19' 23" de latitude Sul, 41° 19' 40" de longitude Oeste, e altitude média de 14 m. Foram avaliadas 25 famílias $F_{5:6}$ derivadas do cruzamento entre um pimentão e uma pimenta da espécie *C. annuum* var. *annuum* (Tabela 1). O pimentão UENF 2285 foi utilizado como parental feminino, variedade altamente suscetível à antracnose tanto em frutos imaturos quanto maduros. Por outro lado, a pimenta UENF 1381 foi utilizada como parental masculino, sendo que esta é resistente à antracnose em ambas as fases de desenvolvimento do fruto (Bento et al., 2017). Os tratamentos foram arranjos sob o delineamento em blocos ao acaso, com três repetições e cinco plantas por parcela, distribuídas em fileiras duplas sob o espaçamento de 1,0 m entre fileiras e 0,5 m entre plantas, totalizando 405 plantas.

Tabela 1. Linhagens F_{5:6} de *Capsicum annum* L. var. *annuum* com as suas respectivas genealogias, níveis de pungência e classificação.

Linhagem	Progênie F_{5:6}	Pungência	Classificação
L1	L313-17-9-7	Presente	Pimenta
L2	L313-17-6-5	Presente	Pimenta
L3	L313-17-6-1	Presente	Pimenta
L4	L313-17-9-2	Ausente	Pimenta doce
L5	L104-2-8-4	Ausente	Mini pimentão
L6	L88-13-2-6	Presente	Pimenta
L7	L104-2-3-6	Presente	Pimenta
L8	L20-17-8-4	Ausente	Pimenta doce
L9	L313-17-7-1	Presente	Pimenta
L10	L313-17-4-7	Presente	Pimenta
L11	L104-2-6-2	Presente	Pimenta
L12	L313-17-7-4	Presente	Pimenta
L13	L104-2-3-3	Presente	Pimenta
L14	L104-2-8-2	Ausente	Mini Pimentão
L15	L20-17-8-6	Presente	Pimenta
L16	L313-17-6-6	Presente	Pimenta
L17	L104-2-6-1	Presente	Pimenta
L18	L104-2-3-4	Presente	Pimenta
L19	L104-2-3-2	Presente	Pimenta
L20	L88-13-2-3	Presente	Pimenta
L21	L88-13-2-5	Presente	Pimenta
L22	L88-5-3-1	Presente	Pimenta
L23	L337-7-3-3	Ausente	Mini pimentão
L24	L250-10-5-4	Ausente	Mini Pimentão
L25	L88-5-3-6	Ausente	Mini Pimentão



Figura 1. Condições experimentais. A) preparo da área com *mulching*; B) Identificação e plantio das mudas; C); Capina, irrigação e tutoramento; D) Práticas de manejo da cultura; E e F) Estádios fenológicos; G) Colheita dos frutos para avaliação de resistência à antracnose e H) Desinfestação de frutos destacados pré-inoculação. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.

Durante o experimento, os tratos culturais foram realizados de acordo com as necessidades das plantas, assegurando um manejo adequado ao longo do ciclo de crescimento, seguindo as recomendações para o cultivo do pimentão (Nick e Borém, 2016). A irrigação foi realizada por meio de um sistema de gotejamento sob o *mulching*, proporcionando uma distribuição precisa da água para as plantas. Os canteiros foram cobertos com *mulching* para reter maior umidade no solo e impedir o crescimento de plantas daninhas (Figura 1).

As plantas foram cultivadas no período compreendido entre maio e outubro de 2021. Durante esse período, as temperaturas médias variaram entre 18 °C e 27 °C. Esse período corresponde à estação seca do ano, caracterizada pelo regime hídrico reduzido (Figura 2).

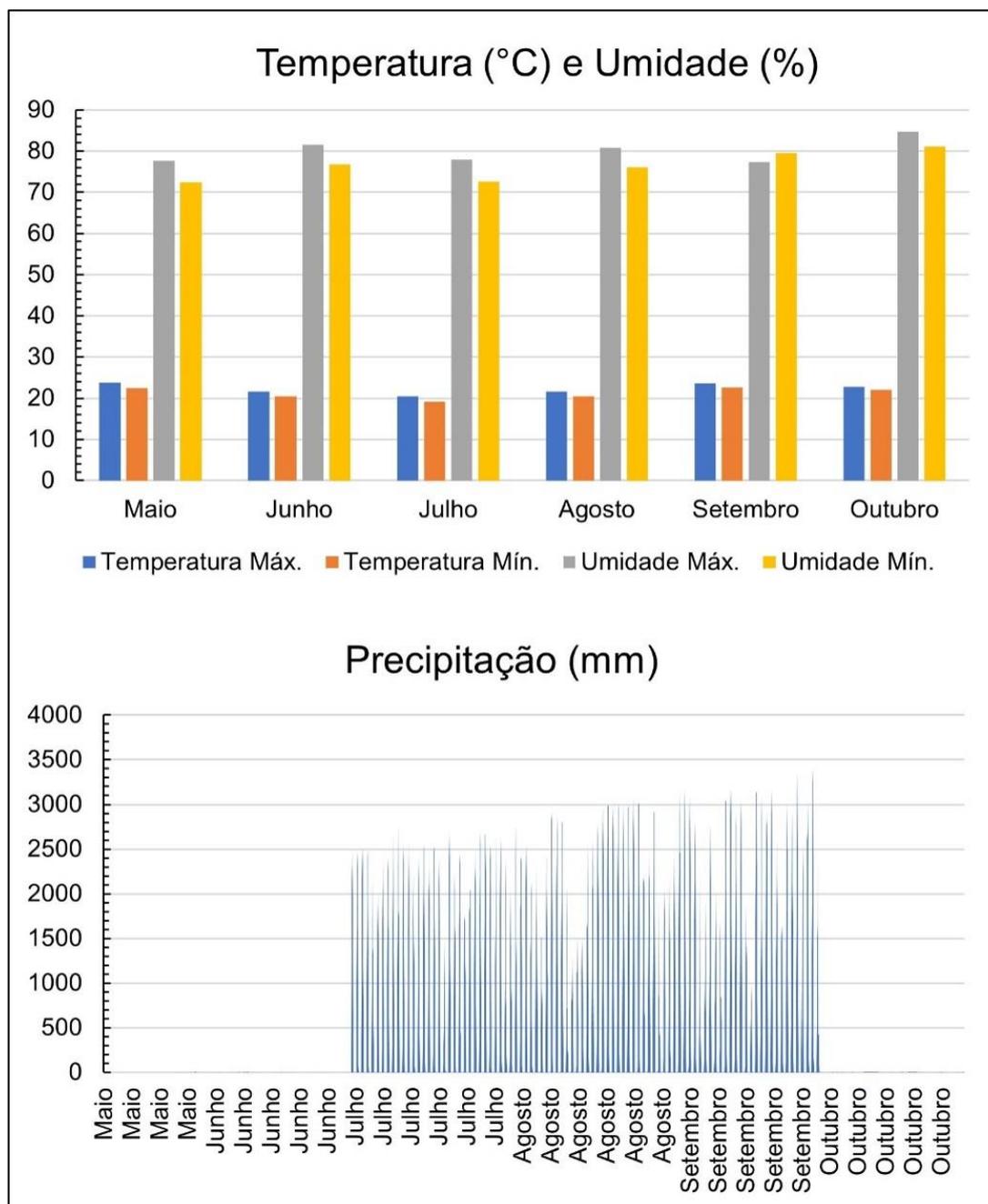


Figura 2. Valores diários de temperatura (°C) máxima, temperatura (°C) mínima, umidade relativa do ar (%) máxima, umidade relativa do ar mínima e precipitação (mm) observados durante os meses de maio a setembro de 2021. UENF, Campos

Antes da implementação do experimento, foi realizada a análise química do solo da área experimental, na profundidade de 0 a 20 cm (Tabela 2). A interpretação das análises e recomendações de adubação mineral foram realizadas com base no Manual de Calagem e Adubação do Estado do Rio de Janeiro (Freire et al., 2013).

Tabela 2. Atributos químicos do solo da área experimental localizada na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro em Campos dos Goytacazes, na profundidade de 0 a 20 cm.

Resultado da análise química do solo									
pH	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	Na	C	MO
H ₂ O	----mg dm ³ ---		-----cmolc dm ³ -----			-----g dm ³ ---			
	--		---						
5,5	11,00	4,60	35,60	22,00	0,00	26,60	2,50	17,50	30,17
SB	T	t	m	V	Fe	Cu	Zn	Mn	
-----cmolc dm ³ ---		-----%-----		-----mg dm ³ -----					
--		--		---					
64,70			0,00		173,40	2,57	7,23	88,74	
	91,12	64,70		71,00					

SB: soma de bases; m: saturação por alumínio; V: saturação de bases; T: capacidade de troca de cátions a pH 7,0; t: capacidade de troca de cátions efetiva.

3.1.3.2. Avaliação de resistência ao *C. scovillei*

Foi utilizado o isolado UEL8.1U de *C. scovillei* [GenBank accession numbers MN121780, MN121791, MN121802, MN121811 and MN121822] (Giacomin et al., 2020). Esse isolado foi obtido de um fruto de pimentão coletado no Mercado Municipal de Campos dos Goytacazes, RJ, e é altamente virulento, conforme anteriormente caracterizado (Almeida et al., 2020; Giacomin et al., 2021). Para o cultivo do isolado, foi utilizado meio de cultura Batata-Dextrose-Ágar, e o crescimento ocorreu em uma estufa incubadora BOD (*Biochemical Oxygen Demand*), mantida a uma temperatura constante de 28 °C, com um fotoperíodo de 12/12 horas, luz/escuro, respectivamente, ao longo de um período de sete dias. A suspensão de conídios foi preparada com água deionizada autoclavada e ajustada a uma concentração de aproximadamente 1×10^6 con.mL⁻¹, cuja contagem se realizou com auxílio de uma câmara de Neubauer e microscópio óptico, seguindo a metodologia descrita por Silva et al. (2014).

Cinco frutos por planta em cada estágio de desenvolvimento (imaturo e maduro) foram colhidos e devidamente desinfestados. De forma a estabelecer um

controle, um desses frutos foi inoculado com água autoclavada, e os outros quatro foram inoculados com 10 μ L da suspensão conidial pelo método de infiltração, utilizando uma agulha entomológica e micropipeta. Em seguida, os frutos foram armazenados em recipientes plásticos e mantidos em câmara úmida, por sete dias com temperatura, umidade relativa e fotoperíodo ajustados para 28 °C, 80% de umidade relativa do ar e 12 h de luz branca, respectivamente (Figura 3).



Figura 3. Preparação da suspensão conidial e inoculação pelo método de infiltração. A- Cultivo *in vitro* de *Colletotrichum scovillei* (isolado UEL8.1U); B- Contagem dos conídios em câmara de Neubauer e microscópio óptico; C- Inoculação dos frutos de *Capsicum annuum* L. var. *annuum* com suspensão conidial pelo método de infiltração e D- Armazenamento dos frutos em câmara úmida. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.

Para avaliar a severidade da doença, os frutos foram submetidos a avaliações diárias durante sete dias consecutivos, começando 24 horas após a inoculação. Utilizou-se a escala de notas de severidade proposta por Araújo et al. (2022). Essa escala de notas foi desenvolvida pelo Laboratório de Melhoramento Vegetal da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro e é específica para o patossistema *Capsicum-Colletotrichum*. A escala de notas atribui valores numéricos ou categóricos aos sintomas da doença observados em cada fruto, permitindo quantificar a severidade da infecção ao longo do tempo (Quadro 1).

Quadro 1. Escala de notas para avaliação da severidade dos sintomas de antracnose em frutos de *Capsicum* spp. (Araújo et al., 2022).

Nota	Nível de resistência	Avaliação Visual	
		Acérvulo/ Hifas	Sintomas
1	Imune	Ausência	Sem sintomas
2	Altamente resistente	Ausência	Lesão necrótica ≤ 1 mm
3	Resistente	Ausência	1 mm < Lesão necrótica ≤ 3 mm
4	Moderadamente Resistente	Ausência	3 mm < Lesão necrótica ≤ 5 mm
5	Moderadamente Suscetível	Ausência	5 mm < Lesão necrótica ≤ 7 mm e/ou lesão encharcada ≤ 5mm
6	Suscetível	Ausência	Lesão necrótica > 7 mm e/ou lesão encharcada > 5 mm
7	Altamente suscetível	Presença	Lesão necrótica ou lesão encharcada ≤ 5 mm
8	Altamente suscetível	Presença	5 mm < lesão necrótica ou lesão encharcada < 10 mm
9	Altamente suscetível	Presença	Lesão necrótica ou lesão encharcada ≥ 10 mm

As notas estimadas diariamente pela escala de Araújo et al (2022) foram utilizadas para o cálculo dos componentes de resistência: área abaixo da curva do progresso da doença (AACPD) tanto para frutos imaturos (AACPDFI) quanto para frutos maduros (AACPDFM). A AACPD é um parâmetro que leva em consideração a taxa de progressão da doença e o acúmulo dos efeitos ao longo do tempo, utilizando os valores de largura médio da lesão (DML) medidos do terceiro ao sétimo dia após a inoculação (DAI). O cálculo da AACPD foi realizado conforme a equação de Campbell e Madden (1990):

$$AACPD = \sum_1^n \left(\frac{y_i + y_{i+1}}{2} \right) (t_{i+1} - t_i); \text{ em que:}$$

n corresponde ao número de observações; y_i ao DML na “ i ”-ésima observação; e t_i ao tempo em dias na “ i ”-ésima observação.

Também foram estimados o período de incubação (PI) e período de latência (PL) em frutos imaturos e maduros. O PI refere-se ao intervalo de tempo, medido em dias, que ocorre entre a inoculação do patógeno nos frutos e o surgimento dos primeiros sintomas da doença. O PL corresponde ao intervalo, em dias, entre a inoculação e o aparecimento de sinais, isto é, como massa conidial visível a olho nu.

3.1.3.3. Fenotipagem dos caracteres morfoagronômicos

Cinco características agronômicas quantitativas foram avaliadas: massa total de frutos (MTF), massa média do fruto (MMF), diâmetro médio do fruto (DMF), comprimento médio do fruto (CMF) e espessura do pericarpo (EPF). A MTF foi calculada pela soma da massa fresca dos frutos obtidos de quatro colheitas, realizadas em média a cada 15 dias e expressa em grama (g); a MMF também foi expressa em grama, obtida pela razão entre a massa fresca total de frutos por planta e o número de frutos por planta.

O LMF, CMF e EPF foram determinados de uma amostra composta por cinco frutos de cada planta. Os valores foram expressos em milímetros (mm) e permitiu uma avaliação precisa do tamanho dos frutos colhidos. Essas três variáveis foram analisadas por meio de imagens digitalizadas, utilizando um scanner (Plustek OpticPro A320, Santa Fe Springs, California, EUA) com resolução de 300 dpi, 24 bits de intensidade e 3508 x 4962 pixels de dimensão. Posteriormente, as imagens geradas no espaço RGB (*Red, Green, Blue*) foram processadas e analisadas com o programa *Tomato Analyzer 4.0* (Ramos et al., 2018).

Foi realizada a análise qualitativa de capsaicina (presença ou ausência). O teste foi realizado com amostras das placentas de três frutos de cada planta, alocadas em microtubos tipo *Eppendorf* contendo 1 mL de solução de vanadato de amônio, conforme metodologia de Derera (2000), com adaptações de Moreira et al. (2010).

3.1.3.4. Análise estatística

3.1.3.4.1. Análise individual

Todas as variáveis foram submetidas ao teste de homogeneidade de Bartlett e normalidade de Lilliefors. Após confirmados os pressupostos para realização da ANOVA, adotou-se o seguinte modelo estatístico:

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

em que: Y_{ij} corresponde a observações na parcela com i -ésimo genótipo no j -ésimo bloco, μ corresponde à média geral, G_i efeito do i -ésimo genótipo considerado fixo, B_j efeito do j -ésimo bloco considerado aleatório, e ξ_{ij} erro aleatório.

Após analisar as significâncias das variáveis, as médias dos genótipos foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Foram aplicados contrastes ortogonais baseados no teste F, para verificar as diferenças entre cada tratamento e o padrão de resistência (UENF 1381). As análises foram realizadas pelo programa Genes (Cruz, 2016).

A partir das esperanças de quadrados médios foram obtidas as estimativas dos componentes de variância. O estimador da variância genotípica entre famílias foi expresso por:

$$\theta_{\sigma}^2 = \frac{QMF - QME}{r},$$

em que:

QMF= quadrado médio de famílias;

QME= quadrado médio do resíduo, e

r = repetição.

O coeficiente de determinação genotípico (H^2) com base na média da família foi estimado pela expressão:

$$H^2 = \frac{\sigma^2 g}{\sigma^2 f},$$

sendo: $\sigma^2 f = \frac{QMF}{r}$ o estimador da variância fenotípica entre famílias.

A variância ambiental foi obtida pela expressão:

$$\sigma^2 = \frac{QME}{r}$$

O coeficiente de variação genético foi expresso por:

$$CV_{g(\%)} = \frac{\sqrt{\sigma^2 g}}{m} \times 100.$$

O estimador do coeficiente de variação experimental foi expresso por:

$$CV_{e(\%)} = \frac{\sqrt{QM_{residuo}}}{m} \times 100.$$

A seleção entre famílias foi realizada pelo índice de seleção de Mulamba e Mock (1978), modificado pela atribuição de pesos arbitrários de 150 para cada variável, pois tanto as variáveis de resistência quanto as agronômicas são de igual importância para a seleção. Para a AACPD de frutos imaturos e maduros, os ganhos com a seleção foram direcionados no sentido negativo. As demais variáveis foram direcionadas com ganhos positivos (PIFI, PIFM, PLFI, PLFM, MTF, MMF, LMF, CMF e EPF). As famílias com menores valores para o índice de soma de *rank* foram selecionadas aplicando-se uma intensidade de seleção de 40%.

Após a seleção dos indivíduos superiores, foi calculado o diferencial de seleção de acordo com a seguinte equação:

$$D_s = X_s - X_o,$$

em que:

D_s = diferencial de seleção;

X_s = média dos indivíduos selecionados; e

X_o = média de todos os indivíduos da população.

O ganho por seleção foi estimado pela seguinte equação:

$$G_s = H^2 \times D_s$$

em que,

G_s = ganho com a seleção;

H^2 = coeficiente de determinação genotípico com base na média das famílias; e

D_s = diferencial de seleção;

3.1.3.4.2. Análise conjunta

Foi realizada a análise de variância conjunta para as características de resistências de acordo com o delineamento em blocos ao acaso, seguindo o modelo estatístico descrito abaixo:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + EM_j + GEM_{ij} + (B/EM)_{jk} + \xi_{ijk}$$

Em que:

μ : média geral;

G_i : efeito do i-ésimo genótipo ($i = 1, 2, \dots, g$);

EM_j : efeito do j-ésimo estágio de maturação ($j = 1, 2, \dots, a$);

GEM_{ij} : efeito da interação do i-ésimo genótipo com o j-ésimo estágio de maturação;

B/EM_{jk} : efeito do k-ésimo bloco dentro do j-ésimo estágio de maturação ($k = 1, 2, \dots, r$);

ξ_{ijk} : erro aleatório.

No modelo descrito, os blocos $[(B/EM)_{jk} \sim \text{NID}(0, \sigma^2_b)]$ e o erro são considerados de efeitos aleatórios $[\xi_{ijk} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)]$ e os genótipos $[G_i \sim \text{NID}(0, \sigma^2_g)]$, os estádios de maturação e a interação genótipo x estágio de maturação são considerados efeitos fixos.

3.1.4. RESULTADOS

3.1.4.1. Análise de variância e parâmetros genéticos

Foi verificada diferença significativa em cinco das seis variáveis de resistência avaliadas, sendo a exceção o PIFI. No que concerne às variáveis morfoagronômicas estudadas, apenas a MTF não apresentou diferença estatisticamente significativa entre as linhagens, conforme indicado pelo teste F ($p \leq 0,01$). Na análise conjunta realizada para as variáveis de resistência, foram evidenciadas diferenças significativas para todas as fontes de variação, genótipos, estágio de maturação e interação G x EM (Tabela 3).

Tabela 3. Resumo da análise de variância individual para as variáveis agronômicas e de resistência e conjunta apenas para as variáveis de resistência de 25 famílias F_{5:6} de *Capsicum annuum* L. var. *annuum* e seus parentais.

Quadrado Médio						
Análise de variância individual						
Variável	Genótipo (GL=26)	Resíduo (GL= 52)	Média	Mín.	Máx.	CV (%)
MTF	0,016 ^{ns}	0,010	0,30	0,08	0,55	33,06
MMF	0,002 ^{**}	0,00002	0,029	0,004	0,185	16,13
DMF	290,56 ^{**}	22,17	36,30	15,61	79,52	12,97
CMF	463,42 ^{**}	93,29	61,02	24,49	94,54	15,82
ESF	0,005 ^{**}	0,0003	0,63	0,56	0,76	2,78
PIFI	0,043 ^{ns}	0,033	2,10	1,56	2,58	8,71
PLFI	1,503 ^{**}	0,018	7,74	4,00	8,01	1,76
AACPFI	54,39 ^{**}	2,64	16,14	12,02	37,50	10,06
PIFM	0,137 ^{**}	0,048	2,53	1,83	3,30	8,65
PLFM	1,188 ^{**}	0,238	7,46	4,00	8,00	6,54
AACPFI	48,63 ^{**}	10,55	16,87	11,00	37,00	19,25

Quadrado Médio						
Análise de variância conjunta						
Variável	Genótipo (GL= 26)	EM (GL= 1)	EM x Genótipo (GL = 52)	Resíduo (GL= 104)	Média	CV (%)
PI	0,08 ^{**}	7,47 ^{**}	0,10 ^{**}	0,04	2,31	8,71
PL	2,57 ^{**}	3,29 ^{**}	0,12 ^{ns}	0,22	7,60	6,21
AACPD	97,28 [*]	21,38 ^{ns}	5,74 ^{ns}	6,59	16,51	15,55

^{ns} não significativo, * e ** significativo com $p \leq 0,05$ e $p \leq 0,01$, respectivamente baseado no teste F. GL = Grau de Liberdade; CV (%) = coeficiente de variação experimental. MTF: massa total de frutos (Kg); MMF: massa média de frutos (Kg); DMF: diâmetro médio do fruto (mm), CMF: Comprimento médio do fruto (mm); ESF: espessura do pericarpo (mm). PIFI: período de incubação de frutos imaturos; PLFI: período de latência de frutos maduros; AACPFI: área abaixo da curva do progresso da doença de frutos imaturos; PIFM: período de incubação de frutos maduros; PLFM: período de latência de frutos imaturos; AACPFI: área abaixo da curva do progresso da doença de frutos maduros. PI: período de incubação; PL: período de latência e AACPD: área abaixo da curva do progresso da doença. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.

O coeficiente de determinação genotípico (H^2) variou de acordo com a característica. Os maiores valores observados para as características de resistência foram 96,14 e 98,75 para AACPFI e PLFI, respectivamente. Além disso, as características morfoagronômicas também apresentaram elevados coeficientes de determinação genotípico (H^2) registrando 93,84 e 99, para EPF e MMF, respectivamente. Os elevados valores do coeficiente de variação genético

(CVg) e valores superiores a um (>1) para a razão CVg/CVe observados indicam uma influência genética consistente nas características estudadas. Esses resultados permitem uma seleção mais precisa de genótipos superiores, tanto em resistência quanto em aspectos morfoagronômicos (Tabela 4).

Os valores do coeficiente de variação experimental (CVe) observados para a maioria das variáveis foram de baixa magnitude, evidenciando uma boa precisão experimental e uma influência ambiental mínima durante a realização do experimento, apenas a MTF obteve valor acima de 30%.

Tabela 4. Estimativa dos componentes de variância e parâmetros genéticos para as variáveis de resistência à antracnose e características morfoagronômicas de frutos em 25 famílias F_{5:6} de *Capsicum annuum* L. var. *annuum* e os respectivos parentais.

Parametro ¹	Famílias F _{5:6}										
	PII	PLI	AACPDI	PIM	PLM	AACPDM	MTF	MMF	LMF	CMF	EPF
σ^2f	0,014	0,50	18,13	0,045	0,39	16,12	0,005	0,0007	96,85	154,47	0,0017
σ^2e	0,011	0,006	0,88	0,015	0,07	3,51	0,003	0,0008	7,39	31,09	0,0001
σ^2g	0,003	0,49	17,25	0,029	0,31	12,69	0,001	0,0007	89,46	123,37	0,0016
H ²	23,15	98,75	95,14	65,12	79,90	78,28	36,10	99,02	92,36	79,86	93,840
CVg	14,35	14,06	40,25	93,69	47,43	11,84	27,11	47,59	29,17	18,20	20,58
CVe	8,7	1,77	10,06	8,63	6,55	19,26	33,06	16,13	12,97	15,82	2,78
CVg/CVe	2,75	9,07	2,55	0,78	1,15	1,09	0,43	5,80	0,96	1,14	2,25
Média	2,1**	7,75**	16,15**	2,53**	7,46**	16,88**	0,30 ^{ns}	0,029**	36,30**	61,02**	0,63**
Mín.	1,57	4,00	12,02	1,83	4,00	11,00	0,08	0,004	15,61	24,49	0,56
Máx.	2,58	8,01	37,5	3,30	8,00	37,00	0,55	0,185	79,52	94,54	0,76

σ^2f : variância fenotípica; σ^2e : variância experimental; σ^2g : variância genotípica; H²: coeficiente de determinação genotípico; CVg: coeficiente de variação genético; CVe: coeficiente de variação experimental; ^{ns} não significativo, ** significativo com $p \leq 0,01$, pelo teste F.

Com base no teste Scott-Knott ($p \leq 0,05$) aplicado às características de resistência, os genótipos foram agrupados diferentemente conforme a característica analisada. A AACPD para frutos imaturos e maduros revelou a formação de dois grupos distintos. O primeiro grupo incluiu as menores médias, abrangendo o parental resistente e todas as vinte e cinco famílias. Já o segundo grupo, consistiu apenas do parental suscetível UENF 2285, com médias de 36,43 e 34,16 para frutos imaturos e maduros, respectivamente (Figura 4). Não foi observada diferença significativa ao comparar os estádios de desenvolvimento do fruto em relação à AACPD.

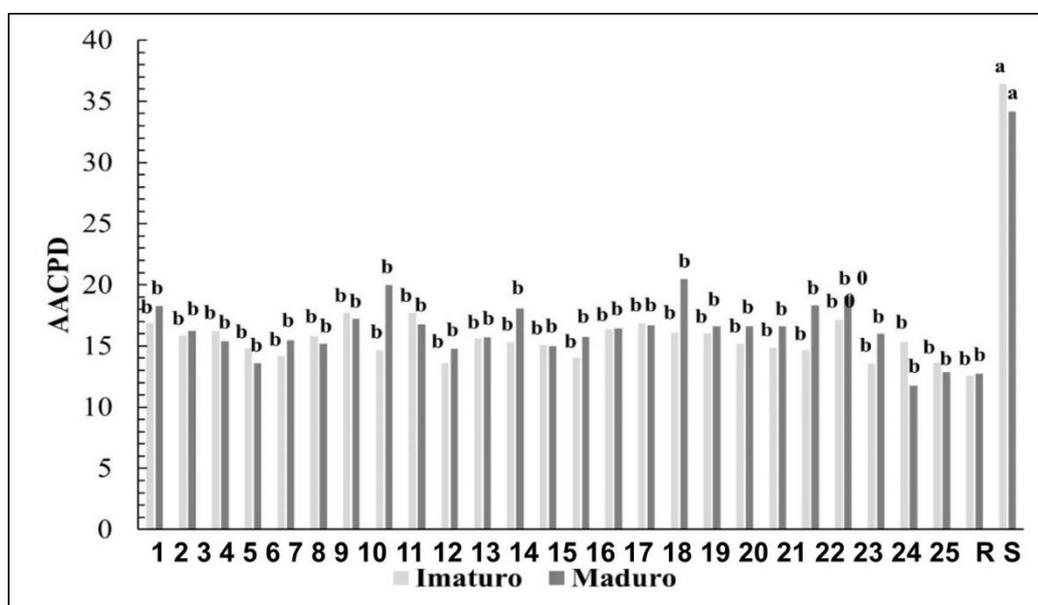


Figura 4. Médias da área abaixo da curva do progresso da doença (AACPD) de frutos imaturos e maduros de 25 linhagens de *Capsicum annuum* L. var. *annuum* e o parentais resistente (R) e suscetível (S) inoculados com *Colletotrichum scovillei*. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.

O período de incubação (PI) se destacou como a variável de resistência com a maior variabilidade fenotípica, agrupando os genótipos em três grupos e evidenciando diferenças significativas entre os estádios de desenvolvimento do fruto (Figura 5). Ao analisar os estádios de frutificação, 23 famílias e os dois parentais obtiveram médias inferiores para o PI de frutos imaturos. Não foram observadas diferenças significativas entre os genótipos no estágio imaturo, sendo que a menor média registrada foi 1,91 para a linhagem L4 (313-17-9-2-2) e a maior

2,31 dias para o parental suscetível UENF 2285. Já para os frutos maduros, foram observados os maiores valores para o PI, com médias variando de 1,91 a 2,96 dias (Figura 5). Ao comparar os genótipos, foram identificados três grupos distintos. O parental resistente (UENF 1381) exibiu uma média de 2,72 dias, sendo agrupado no grupo com a maior média, enquanto o parental suscetível UENF 2285 foi agrupado com mais duas linhagens no terceiro grupo, exibindo uma média de 1,91 dias para o PI.

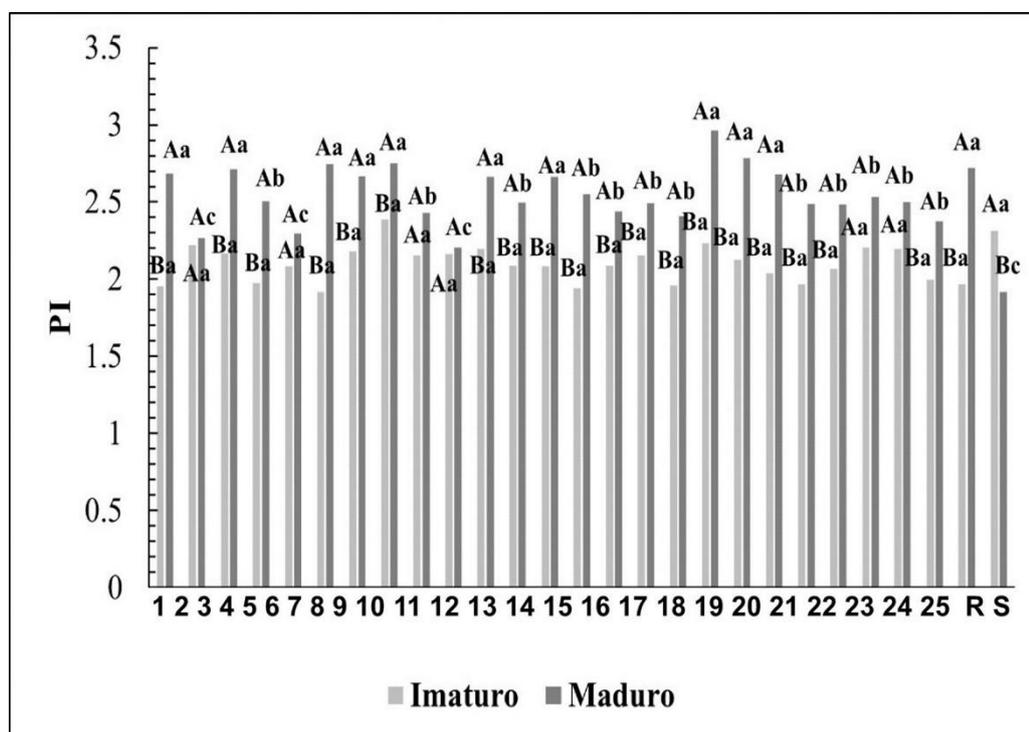


Figura 5. Médias do período de incubação (PI) de frutos imaturos e maduros de 25 linhagens de *Capsicum annum* L. var. *annuum* e o parentais resistente (R) e suscetível (S) inoculados com *Colletotrichum scovillei*. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024

A variável PL (período de latência) demonstrou diferenças significativas entre os estádios de desenvolvimento do fruto e entre os genótipos. Todas os genótipos tiveram maiores médias no estágio imaturo. Ao comparar os genótipos, a menor média foi observada para o parental suscetível UENF 2285, com PL de 4,25 e 4,58 para fruto imaturo e maduro, respectivamente. Por outro lado, o parental

resistente exibiu médias de PL de 8,00 e 7,75 para fruto imaturo e maduro, respectivamente (Figura 6).

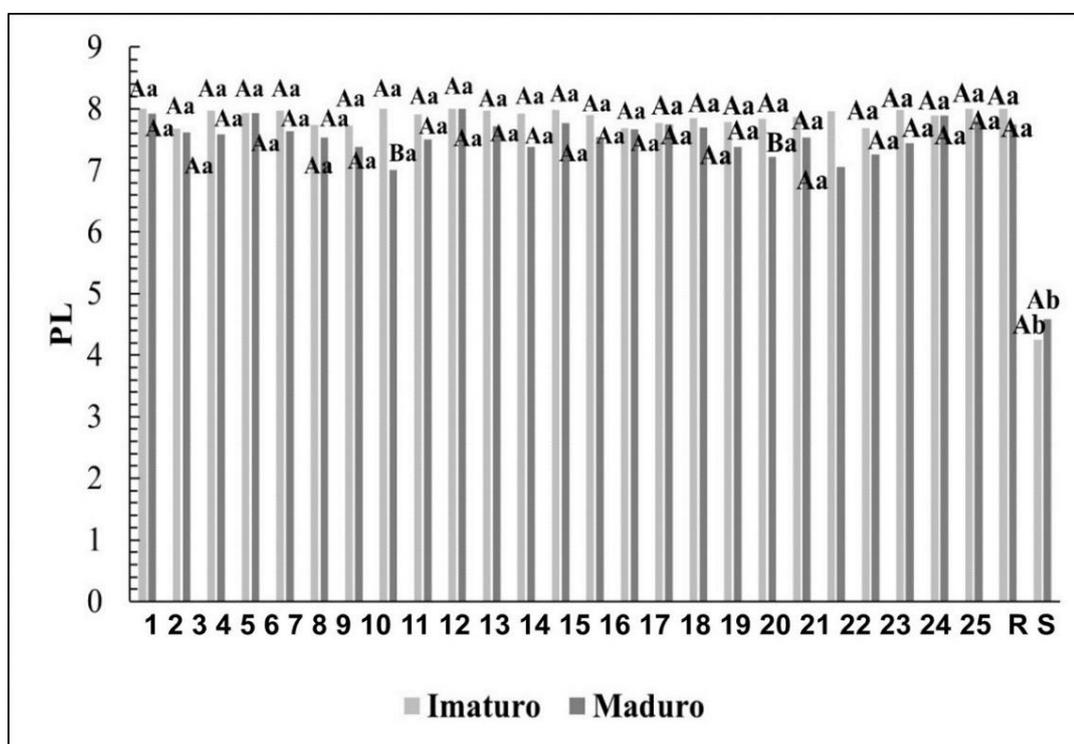


Figura 6. Médias do período de latência (PL) de frutos imaturos e maduros de 25 linhagens de *Capsicum annum* L. var. *annuum* e o parentais resistente (R) e suscetível (S) inoculados com *Colletotrichum scovillei*. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024

Em relação as dimensões do LMF e CMF, o parental UENF 1381 obteve os menores valores em comparação com o parental UENF 2285 e as demais famílias. O maior valor de LMF foi observado no parental UENF 2285, com média de 75,14 mm. Quanto ao CMF, algumas famílias obtiveram médias iguais ou superiores a do parental UENF 2285 (Figura 7). Esses valores se devem ao fato de que frutos com maior largura e comprimento, são características típicas do pimentão.

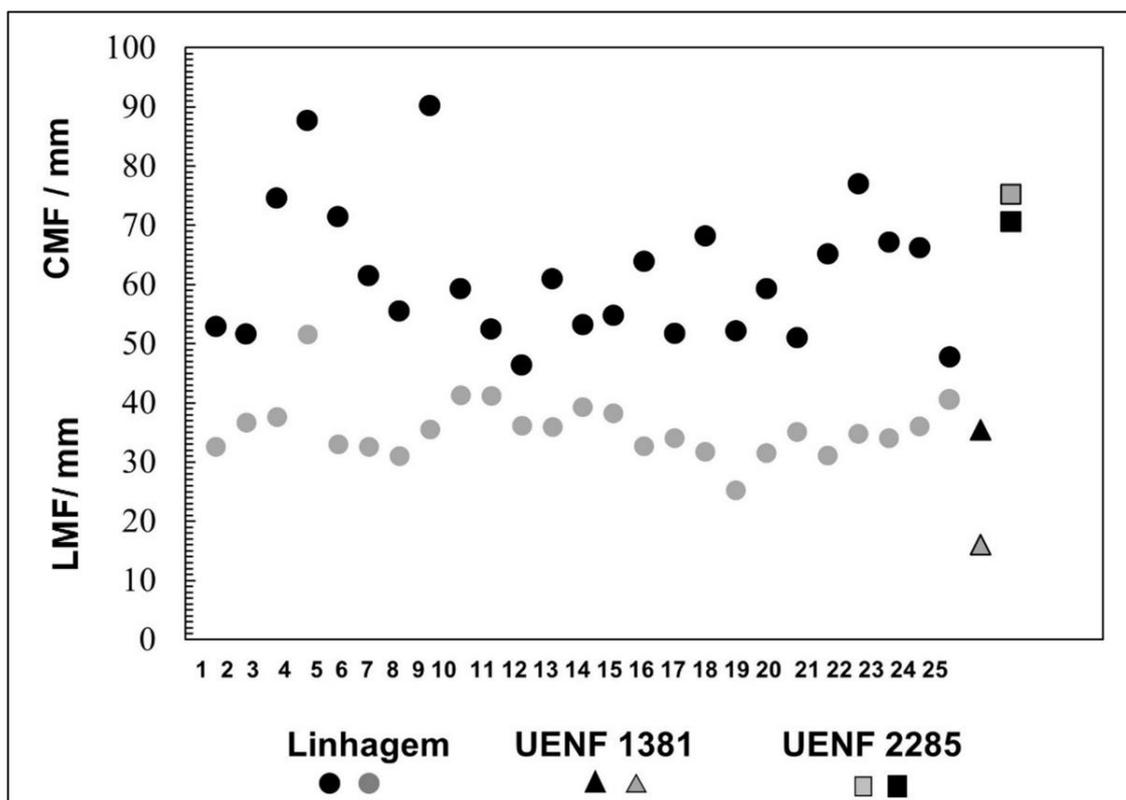


Figura 7. Médias da largura média do fruto (LMF) e comprimento médio do fruto (CMF) de 25 linhagens de *Capsicum annuum* L. var. *annuum* e os respectivos parentais. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.

3.1.4.2. Seleção das famílias F_{5:6} superiores

Os ganhos com a seleção das melhores famílias, selecionadas por meio de variáveis de resistência e agronômicas pelo índice de Mulamba e Mock (1978), são apresentados na Tabela 5. Dez famílias foram selecionadas e os ganhos obtidos variaram entre positivos e negativos, dependendo da característica analisada (Tabela 5).

Os ganhos por seleção foram positivos para quatro das cinco características agronômicas relacionadas ao fruto. A média dos selecionados foram de 0,31 g, 0,03 g, 38,46 mm, 65,67 mm e 0,64 mm para MTF, MMF, LMF, CMF e EPF, respectivamente. O ganho por seleção (GS%) variou de 1,16% a 6,09% para EPF e CMF, respectivamente.

Em relação às variáveis de resistência, destaca-se a AACPD de frutos imaturos e maduros cujas novas médias reduziram e atingiram os valores de 14,65 e 15,04 para AACPDFI e AACPDFM, respectivamente. Esses resultados indicam uma efetiva melhoria nas características de resistência, proporcionando uma resposta positiva ao processo seletivo adotado, representando também uma superioridade notável na resistência à antracnose, evidenciada pela diferença negativa entre os valores da média inicial e a média dos selecionados, resultando em ganhos genéticos substanciais de 8,78% e 8,49% para AACPDFI e AACPDFM, respectivamente.

Tabela 5. Estimativa dos ganhos genéticos com a seleção de dez famílias F_{5:6} de *C. annuum* L. var. *annuum* pelo índice de Mulamba e Mock (1978) considerando as características de resistência à antracnose e agronômicas.

Variável	Xo	Xs	GS	GS%
PIFI	2,10406	2,14457	0,00938	0,45
PLFI	7,74946	7,96993	0,21773	2,81
AACPDFI	16,14884	14,65827	-1,41823	-8,78
PIFM	2,53377	2,52013	-0,00886	-0,35
PLFM	7,46427	7,67727	0,17018	2,28
AACPDFM	16,87548	15,0455	-1,43284	-8,49
MTF	0,30719	0,31997	0,00461	1,5
MMF	0,0300	0,02967	-0,00033	-1,09
DMF	36,30291	38,46047	1,99287	5,49
CMF	61,02016	65,67317	3,71624	6,09
EPF	0,63789	0,6458	0,00742	1,16

PIFI: período de incubação de fruto imaturo; PLFI: período de latência de fruto imaturo; AACPDFI: área abaixo da curva do progresso da doença de fruto imaturo; PIFM: período de incubação de fruto maduro; PLMI: período de latência de fruto maduro; AACPDFM: área abaixo da curva do progresso da doença de fruto maduro; MTF: massa total do fruto; MMF: massa média do fruto; DMF: diâmetro médio do fruto; CMF: comprimento médio do fruto e EPF: espessura do pericarpo. Xo: média inicial; Xs: média dos selecionados; GS: ganho de seleção; GS%: porcentagem de ganho de seleção. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.

As dez famílias selecionadas foram ranqueadas pelo índice de Mulamba e Mock (1978). Os frutos das famílias selecionadas possuem diferentes fenótipos, coloração, formato e nível de pungência (Quadro 2).

Quadro 2. Rank, pungência, classificação e fenótipo de dez famílias F_{5.6} superiores de *C. annuum* L. var. *annuum* resistentes à antracnose selecionadas pelo índice de Mulamba e Mock (1978).

Rank	Linhagem	Famílias selecionadas	Pungência	Classificação	Fenótipo
1	L4	313-17-9-2-2	Ausente	Pimenta doce	
2	L11	104-2-6-2-2	Presente	Pimenta	
3	L23	337-7-3-3-3	Ausente	Mini pimentão	
4	L14	104-2-8-2-2	Ausente	Mini pimentão	
5	L5	104-2-8-4-4	Ausente	Mini pimentão	
6	L20	88-13-2-3-3	Presente	Pimenta	
7	L10	313-17-4-7-7	Presente	Pimenta	
8	L21	88-13-2-5-5	Presente	Pimenta	
9	L24	88-5-3-6-6	Ausente	Mini pimentão	
10	L1	313-17-9-7-7	Presente	Pimenta	

Entre as linhagens selecionadas, quatro são mini pimentão, uma pimenta doce e cinco pimentas. O mini pimentão tem como principais características o comprimento, diâmetro e massa de fruto. Essas medidas podem variar entre 5 e 7 cm, 3,5 e 4 cm e 24 e 27 g, respectivamente (Isla sementes, 2024). As linhagens L5, L14, L23 e L24 tiveram médias variando entre 5 e 7 para CMF e 3,5 e 4 para DMF estando de acordo com os critérios de classificação do mini pimentão.

O parental resistente UENF 1381 foi altamente resistente a antracnose em ambos os estádios de maturação do fruto, ao longo de sete dias de avaliação após inoculação com *Colletotrichum scovillei*, o fenótipo do fruto apresentou uma minúscula lesão necrótica no ponto de inoculação e não apresentou esporos visíveis a olho nu (Figura 8).

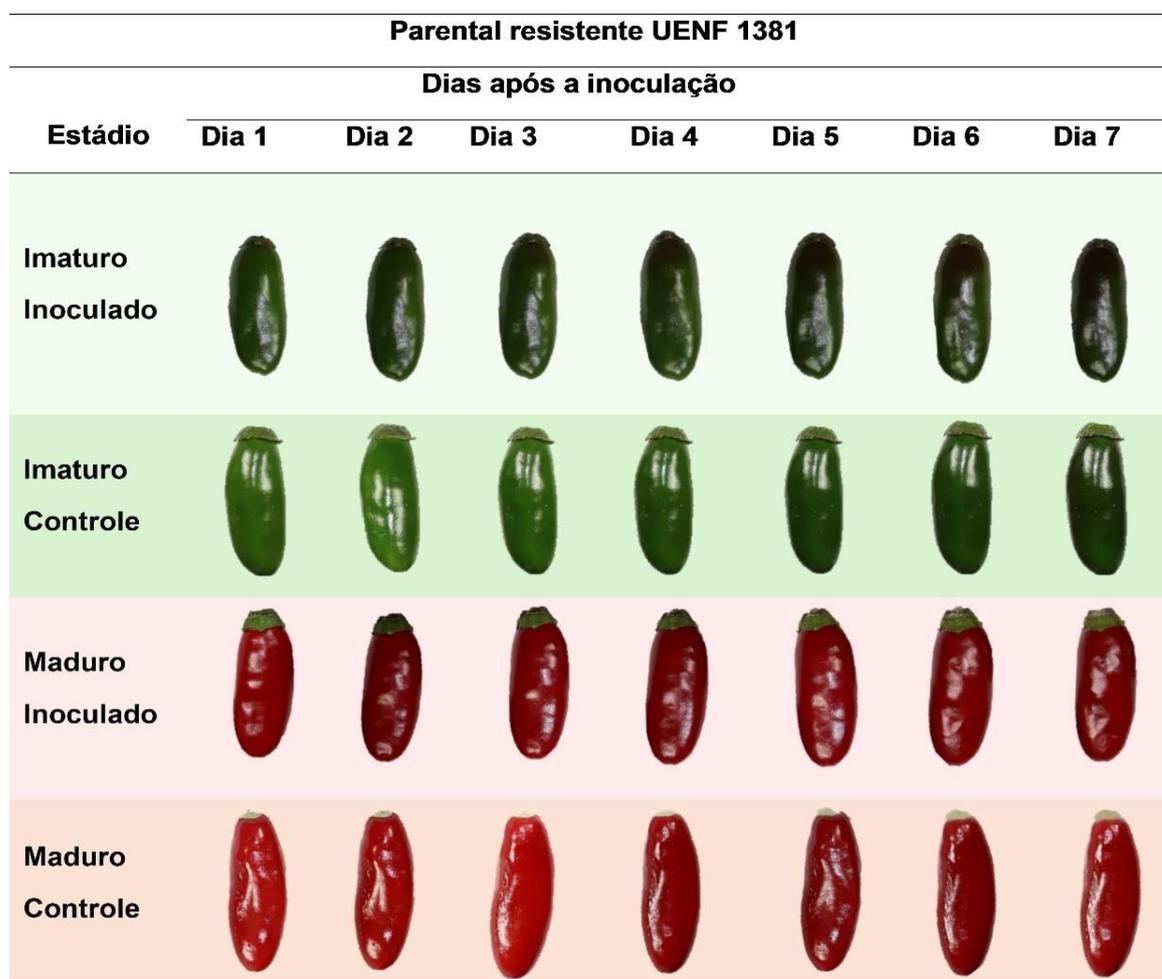


Figura 8. Fenótipo do parental masculino (UENF 1381) resistente à antracnose em frutos imaturos e maduros (*C. annuum* L. var. *annuum*) avaliados por sete dias após a inoculação com *Colletotrichum scovillei*. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024

Por outro lado, o fenótipo do parental suscetível UENF 2285 apresentou severa modificação em seu fenótipo ao longo dos setes dias de avaliação, em ambos os estádios de maturação do fruto. A partir do segundo dia, observou-se o surgimento dos primeiros sintomas, resultando em um baixo PI, a partir do terceiro dia foi possível observar acérvulos e hifas resultando em um baixo período de latência (PL) (Figura 9).

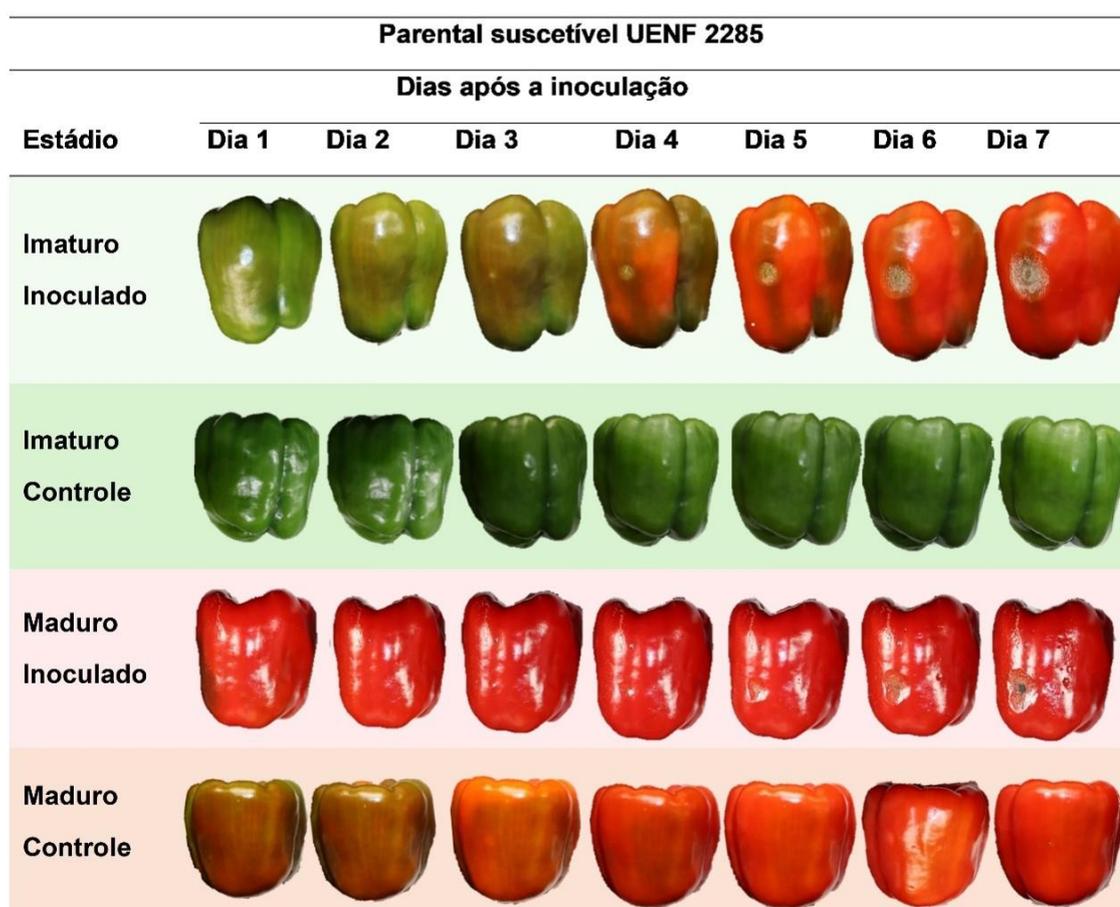


Figura 9. Fenótipo do parental feminino (UENF 2285) suscetível à antracnose em frutos imaturos e maduros (*C. annuum* L. var. *annuum*) avaliados por sete dias após a inoculação com *Colletotrichum scovillei*. Mudar o suscetível. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.

A linhagem 313-17-9-2-2 (L4) teve fenótipo similar ao parental resistente UENF 1381, com baixo PI e PL em ambos os estádios de maturação do fruto (Figura 10).

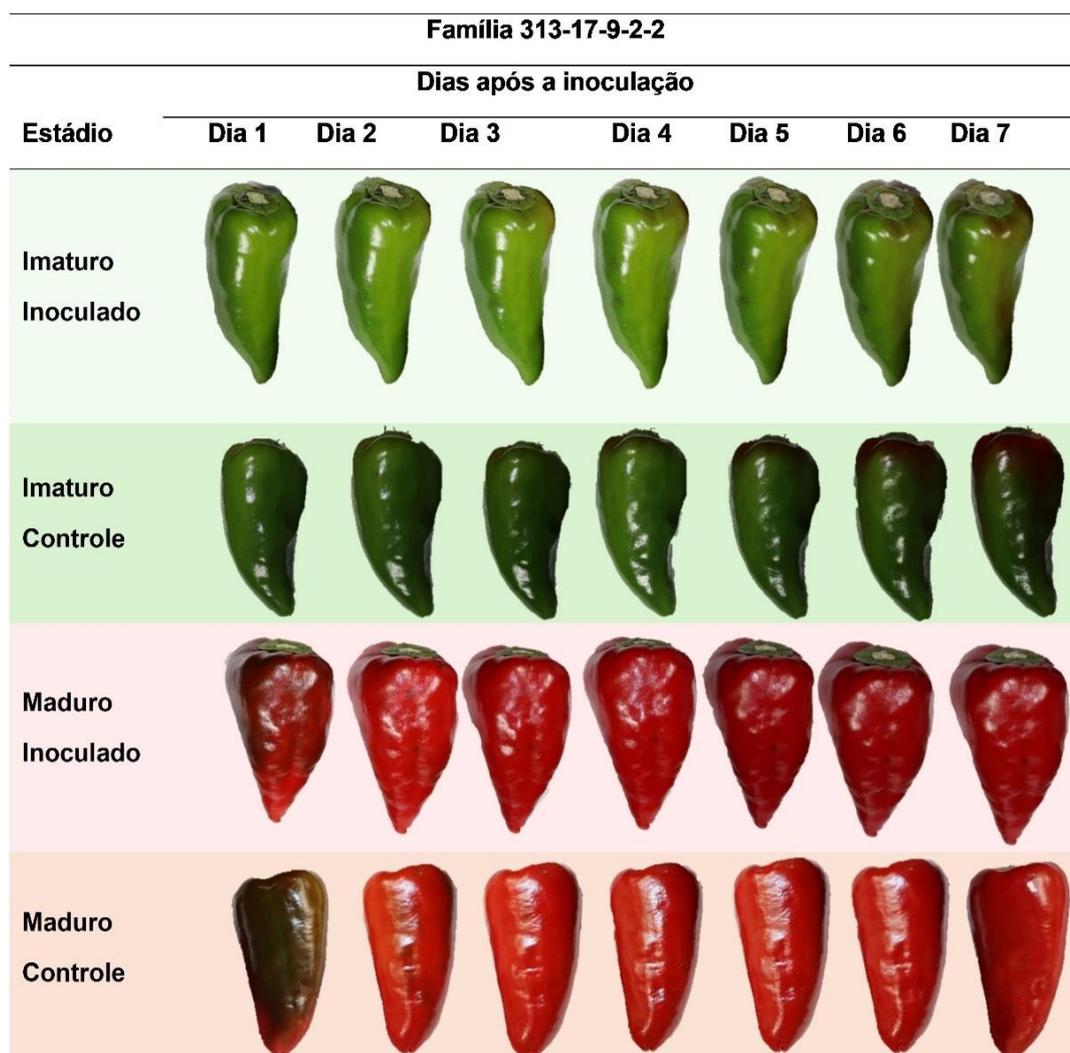


Figura 10. Fenótipo da família 313-17-9-2-2 selecionada para a resistência à antracnose em frutos imaturos e maduros (*C. annum* L. var. *annuum*) avaliados por sete dias após a inoculação com *Colletotrichum scovillei*. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024

3.1.5. DISCUSSÃO

O parental UENF 1381 é uma pimenta altamente resistente à antracnose causada pelo *C. scovillei* em frutos imaturos e maduros. Seus frutos têm aproximadamente 3,5 cm de comprimento e 1,0 cm de diâmetro. O pericarpo tem uma espessura de 0,5 mm. A massa média de fruto é de 7,3 g. Embora as características agrônômicas não sejam desejáveis para o mercado consumidor, a

resistência à antracnose tornou esse acesso valioso para o desenvolvimento de linhagens promissoras, principalmente por ser da mesma espécie e variedade botânica do pimentão (Barboza et al., 2022). E por esses motivos é que esse genótipo foi selecionado como parental doador dos genes de resistência no programa de melhoramento de *Capsicum* da UENF. Esse programa objetiva desenvolver cultivares que possam atender diferentes nichos de mercado, contribuir para uma agricultura mais sustentável e para a formação de profissionais qualificados.

Ao longo das gerações avançadas pelo método genealógico, a seleção foi realizada na escolha individual de plantas, buscando obter plantas com maiores níveis de resistência de acordo com os melhores valores genéticos preditos (Araújo, 2020; Alencar 2022). Na geração atual F_{5,6}, com nível médio de homozigose de 93,75%, com as progênies já demonstrando uniformidade em diversos caracteres morfológicos e de resistência, a seleção foi realizada com base nas médias das famílias, em vez de depender exclusivamente da avaliação individual de plantas. Esse incremento na homozigose sinaliza uma maior estabilidade genética nas progênies, proporcionando uma seleção mais eficaz dos genótipos resistentes. Outro elemento que contribuiu para a eficiência da seleção das famílias foi a alta herdabilidade nos caracteres avaliados. Neste estudo, a herdabilidade expressa pelo coeficiente de determinação genotípico (H^2) variou de média a alta, dependendo da característica analisada. Esses resultados confirmam que a resistência observada nas famílias foi conferida pelo aumento da endogamia para características de resistência provenientes do parental resistente UENF 1381.

Na geração F_{5,6}, objeto deste estudo, não se evidenciou diferença significativa para a AACPD entre frutos imaturos e maduros, e não houve diferença significativa entre as linhagens e o parental resistente UENF 1381. Isso sugere que a seleção das progênies nas etapas anteriores foi eficiente, indicando que o método genealógico favoreceu a fixação e transmissão dos genes de resistência ao longo das gerações, método este praticado com base no genótipo do indivíduo (Borém et al., 2017). Esse resultado destaca a eficácia do processo de seleção genética na obtenção de plantas com resistência à antracnose, em ambos os estádios de desenvolvimento do fruto, em todas as gerações.

Em relação ao período de incubação, foram observados maiores valores em frutos imaturos. O PI corresponde ao período em dias entre a inoculação do patógeno até o aparecimento dos primeiros sintomas da doença. Quanto maior o valor de PI e de PL, maior é a resistência da planta hospedeira à colonização pelo patógeno (Vallavieille-Pope et al., 2000). Destaca-se que, na linhagem 313-17-9-2-2 (L4) assim como no parental resistente UENF 1381, foi observada uma resposta rápida à infecção pelo patógeno, manifestada por lesões necróticas minúsculas no ponto de inoculação, semelhante a reação de hipersensibilidade. Essas lesões permaneceram estáticas ou desenvolveram-se muito lentamente ao longo dos dias subsequentes de avaliação, sem apresentarem esporos visíveis a olho nu até o último dia de observação. Isso resultou em um PL superior a sete dias e um baixo valor de AACPD em frutos imaturos e maduros e, conseqüentemente, essa linhagem assumindo o topo do *ranking* das famílias selecionadas.

A herança da resistência à antracnose do acesso UENF 1381 é expressa de forma independente nos diferentes estádios fenológicos do fruto. No estágio de frutos imaturos o controle genético da resistência é regido por dois genes dominantes. Além disso, foi constatada a complementação epistática, o que significa que a presença de um alelo em um gene pode compensar a ausência de alelos em outro gene, resultando na expressão do fenótipo resistente. Em contraste, em frutos maduros, a resistência à antracnose é possivelmente controlada por dois genes dominantes diferentes. Isso sugere uma complexidade genética na determinação da resistência nesse estágio fenológico (Giacomin et al., 2020).

As dez famílias selecionadas neste estudo, com base no índice de Mulamba e Mock (1978), têm origem em quatro indivíduos F_2 , identificados como 88, 104, 313 e 337. É possível que, entre as dez famílias selecionadas neste estudo, apenas quatro promissoras sejam escolhidas para o ensaio preliminar de produtividade (EPL). Isso se deve ao fato de as linhagens apresentarem um ancestral comum, o que sugere uma proximidade genética. Em virtude dessa similaridade genética, a seleção de apenas uma delas seria mais representativa.

Considerando o objetivo desta pesquisa em obter pimentão e pimenta resistentes à antracnose, seria interessante optar pela seleção de famílias levando

em consideração também o fenótipo do fruto. Essa abordagem permitiria explorar uma maior variabilidade genética, possibilitando a obtenção de variedades que atendam a diferentes necessidades e preferências do mercado consumidor.

3.1.6. CONCLUSÕES

O método genealógico e a seleção com base no índice de soma de *rank* de Mulamba e Mock (1978), demonstraram ser eficientes na seleção de famílias $F_{5:6}$ superiores para a resistência à antracnose.

Dez famílias têm potencial na obtenção de linhagens resistentes à antracnose em frutos imaturos e maduros, com fins comerciais. Quatro dessas possuem o fenótipo de mini pimentão, sendo elas: 337-7-3-3-3, 104-2-8-2-2, 104-2-8-4-4 e 88-5-3-6-6.

3.2. SENSORES APLICADOS AO MELHORAMENTO DE PLANTAS: ÍNDICES DE REFLETÂNCIA FOLIAR (IRFs) E A RESISTÊNCIA À ANTRACNOSE EM *Capsicum annuum* L. var. *annuum*

3.2.1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, o surgimento de patógenos e pragas, a escassez de recursos naturais e o rápido crescimento populacional representam os desafios centrais enfrentados pelos melhoristas de plantas no século XXI (Hickey et al., 2019). No entanto, os avanços nas estratégias de melhoramento, aliados ao uso de ferramentas não destrutivas e altamente eficientes, têm acelerado significativamente os processos visando uma agricultura mais sustentável, capaz de manter a produtividade agrícola e garantir a segurança alimentar necessária para as próximas gerações (Carena, 2021; Araus et al., 2018).

Tradicionalmente, a avaliação de resistência a doenças é realizada utilizando a metodologia de atribuição de notas com base no julgamento visual dos sintomas (Bock et al., 2020) e naturalmente pode trazer erros associados à subjetividade do avaliador. A escala de avaliação desejável para avaliar a severidade da doença é aquela que apresenta o menor erro possível e é fácil de aplicar por qualquer avaliador, experiente ou não no patossistema em avaliação, e que tenha alta acurácia e precisão (Araújo et al., 2022). A acurácia (concordância) representa a proximidade entre a estimativa (ou medição) e o valor real. Já a

precisão (associação/repetibilidade) é a variabilidade das estimativas ou a extensão na qual a mesma estimativa obtida em diferentes condições produz resultados semelhantes (Ching et al., 2016; Miller-Butler et al., 2019).

Duas escalas de severidade já foram propostas para o patossistema *Capsicum-Colletotrichum*, uma desenvolvida por Montri et al. (2009) e uma mais recente proposta por Araújo et al. (2022). Entretanto, essas metodologias ainda levam em consideração a subjetividade do avaliador, além de serem laboriosas, podendo conduzir o avaliador ao erro relativo ao extenso período para realizar as avaliações. Devido à complexidade da herança de resistência ao *Colletotrichum scovillei*, novos métodos de análise da interação planta-patógeno são necessários, a fim de auxiliar o melhorista na identificação e seleção de genótipos resistentes de forma mais rápida e precisa. Neste contexto, os índices de refletância foliar (IRFs) podem ser utilizados para a seleção indireta de características.

Para o desenvolvimento dos IRFs são utilizados diferentes comprimentos de onda espectral dependendo do objetivo da pesquisa. Com a aplicação de sensores e análise de índices de refletância foliar, os melhoristas podem obter informações precisas sobre as características das plantas, como níveis de clorofila, teor de nutrientes e resposta a estresses abióticos e bióticos (Lozada et al., 2019, Natarajan et al., 2019). Esses dados são fundamentais para a seleção de genótipos com maior resistência a doenças foliares, estresses ambientais e desempenho agrônômico, contribuindo assim para o desenvolvimento de cultivares mais produtivas e sustentáveis (Heim et al., 2019; Kalaivani et al., 2020).

Dentre os diferentes índices de refletância foliar, destacam-se o NPCI (Índice de Clorofila Pigmentada Normalizada) e o Ctr2 (Índice de Carter 2), os quais estão diretamente relacionados com a proporção de pigmentos fotossintéticos totais em relação à clorofila. Esses índices têm sido aplicados para estimar o status de nitrogênio das plantas, um nutriente essencial não apenas para o crescimento, mas também desempenha um papel importante na resistência a doenças (Peñuelas et al., 1994; Zhao et al., 2003). O nitrogênio compõe as moléculas de proteínas exercendo um papel fundamental na produção de proteínas relacionadas à patogênese (PR), as quais estão envolvidas em respostas de defesa contra patógenos (Dallagnol, 2018).

O objetivo do presente estudo foi desenvolver um protocolo destinado à identificação de linhagens de *Capsicum. annuum* L. var. *annuum* resistentes à antracnose em frutos, empregando índices de refletância foliar.

3.2.2. REVISÃO DE LITERATURA

3.2.2.1. Origem dos termos genótipo e fenótipo

O termo “fenótipo” vem do grego *phainô* (mostrar, aparecer) e *tupus* (tipo, marca). Foi descrito pela primeira vez em 1911 pelo biólogo dinamarquês Wilhelm Johannsen: “todos os tipos de organismos podem ser distinguíveis por inspeção direta ou por métodos mais refinados de medição ou descrição”. Inicialmente, o termo era aplicado principalmente para características macroscópica visível, como tamanho, cor, taxa de crescimento, número de grãos, padrão da semente, dentre outros. No mesmo trabalho, o termo "genótipo" foi introduzido para descrever o conjunto total de genes presentes em um organismo, representando a informação genética herdada de seus pais. Desta forma, ele utilizou "genótipo" para distinguir o conjunto de genes de um organismo e o "fenótipo" a sua expressão física. A introdução desses termos foi um avanço significativo na compreensão da genética, proporcionando uma maneira mais precisa de descrever a relação entre os traços observáveis de um organismo (fenótipo) e sua informação genética (genótipo) (Gjuvslund et al., 2013).

Os estudos sobre a herança de características contribuíram significativamente para os avanços na genética, proporcionando uma compreensão mais profunda dos mecanismos subjacentes às diversas variações fenotípicas. No livro "Sex Limited Inheritance in *Drosophila*" (1910), Morgan e seus colaboradores, embora não tenham feito uso dos termos "genótipo" e "fenótipo", propuseram uma distinção alternativa entre esses conceitos. Morgan empregou as terminologias "caracteres" e "fatores" (fatores mendelianos). Seu estudo, fundamentado nos princípios de Mendel e na exploração do fenômeno de ligação genética, associou variações discretas em características observáveis em *Drosophila* a fatores (genes) localizados nos cromossomos. Esses resultados não apenas fortaleceram a teoria

cromossômica da hereditariedade, mas também estabeleceram os alicerces da genética moderna. Na abordagem de Morgan, é a clara diferença observável em uma característica, como a cor dos olhos (rosa ou branca), que permite a inferência de uma alteração em um fator específico localizado em um *locus* cromossômico particular. Existe uma correspondência direta entre a variação da característica e a variação genética, a menos que haja dominância completa, mas nesse caso, progênes adicionais resolvem essa ambiguidade (Vienne et al., 2022).

A brilhante proposta de Johannsen para distinguir fenótipo de genótipo surgiu de sua interpretação precisa de experimentos de seleção no tamanho de sementes de feijão. Esta característica, poligênica e com variação contínua, revelou que em estoques homozigotos não havia resposta à seleção por sementes grandes ou pequenas, ao passo que em populações geneticamente heterogêneas, a seleção era eficaz (Johannsen, 1911).

Mendel em 1866, observou que cada característica selecionada para seus experimentos apresentava uma diferença, seja na forma ou na coloração (como sementes redondas ou enrugadas, vagens verdes ou amarelas). De maneira semelhante, Morgan et al. (1910) propuseram que os "fatores mendelianos" são responsáveis por uma diferença observada em uma característica, não pela característica em si. Eles ilustraram isso com três observações: (i) uma característica pode ser modificada por mutações em diferentes *loci* (registraram até 25 mutações afetando a cor dos olhos em *Drosophila*); (ii) uma mutação específica pode alterar diferentes características (o fator para asas rudimentares também afeta as pernas, o número de ovos postos e sua viabilidade. Embora o termo não fosse utilizado na época, isso caracteriza a pleiotropia); (iii) múltiplos alelos podem ser encontrados em um dado *locus*, resultando em várias manifestações de uma característica (como cor dos olhos branca/vermelha/eosina). Além disso, eles relataram casos em que uma diferença genética não é visível em nível fenotípico, devido a influências ambientais ou outros fatores genéticos. Por exemplo, em *Prímula*, a diferença genética de cor das flores entre vermelho e branco não é mais visível quando as plantas são cultivadas a 30°C-35°C, pois, em altas temperaturas, todas as flores se tornam brancas. Em *Drosophila*, a diferença genética de cor dos olhos entre rosa e vermelho não é visível se a mosca for homozigota para branco/branco em um dos outros *loci* que influenciam a cor dos olhos. Isso exemplifica a epistasia, termo cunhado por Bateson já em 1907 (Vienne, 2022).

3.2.2.2. Fenotipagem de alto rendimento

O termo fenotipagem se refere ao processo de observar e medir características observáveis de um organismo, conhecidas como fenótipos. As manifestações físicas, fisiológicas e comportamentais de um organismo são resultantes da interação entre seus genes (genótipo) e o ambiente. Desta forma a fenotipagem envolve a análise e descrição dessas características para entender melhor como os genes se expressam e interagem com fatores ambientais (Vienne, 2022). A fenotipagem em larga escala é uma ferramenta que objetiva a caracterização e mensuração das características de forma rápida e em larga escala, e pode incluir a medição de características específicas em plantas, animais, microrganismos ou até mesmo em seres humanos, dependendo do campo de estudo. Nela, busca-se avaliar grande número de indivíduos para muitos caracteres, de modo não destrutivo, e sempre buscando alta acurácia e precisão, podendo ser utilizada durante todo o ciclo da cultura (Borém et al., 2017).

O desenvolvimento e uso de ferramentas para automatizar a fenotipagem, sem sacrificar o poder de predição, é, sem dúvidas, o principal desafio para a sua implementação. Nas últimas décadas, muitas plataformas de fenotipagem de alto rendimento e sistemas automatizados foram desenvolvidos e isso tem permitido reduzir a demanda por mão de obra em laboratórios, casas de vegetação e campo (Negel et al., 2012). Frequentemente a fenotipagem de alto rendimento é amplamente baseada em sensoriamento remoto, utilizando uma variedade de dispositivos, como sensores multiespectrais, hiperespectrais, de fluorescência e térmicos. Esses instrumentos são empregados tanto em plataformas terrestres, quanto em aéreas para medir a radiação refletida ou emitida pelo dossel das culturas. As câmeras RGB também são comuns, especialmente em abordagens de baixo custo para a fenotipagem, explorando as possibilidades oferecidas por imagens coloridas. Essas ferramentas possibilitam a avaliação de componentes fisiológicos relacionados à produtividade e à adaptação das culturas a condições ambientais adversas (Araus & Cairns, 2014).

Os critérios de escolha da melhor abordagem devem levar em consideração a característica e o momento para realizar a avaliação. Os traços mais bem-

sucedidos para avaliação integram, ao longo do ciclo da cultura, tanto no tempo quanto no espaço, o desempenho da cultura em termos de captura de recursos (por exemplo, radiação, água e nutrientes) e como esses recursos são utilizados de maneira eficiente (Araus & Cairns, 2014). A simplificação de equiparar diretamente o sensoriamento remoto à fenotipagem de alto rendimento é destacada, uma vez que existem diversas categorias de características analíticas, incluindo aquelas relacionadas à qualidade dos grãos/frutas e indicadores como isótopos estáveis. Existem diferentes abordagens de sensoriamento remoto, como o LiDAR (*Light Detection and Ranging*) e radar. O avanço na capacidade de resolução dos dispositivos, juntamente com o aumento na autonomia de veículos aéreos não tripulados, contribui para a popularização dessas plataformas (Araus & Kefauver, 2018).

A detecção precoce de estresse em plantas ainda é um desafio, mas várias técnicas, como fluorescência da clorofila, espectroscopia visível e de infravermelho, e imagem hiperespectral, têm sido testadas. Avanços recentes na recuperação da fluorescência da clorofila e o uso de algoritmos aprimorados possibilitam a medição ágil desses parâmetros sutis de estresse. Alguns dados hiperespectrais como o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) são utilizados para inferir sobre propriedades químicas das folhas, destacando a capacidade de avaliar respostas fisiológicas e bioquímicas das características às condições ambientais. Apesar das promissoras aplicações, as assinaturas espectrais do dossel são influenciadas por fatores externos, exigindo em algumas situações a avaliação de folhas individuais com adaptadores especiais para aprimorar a avaliação geral da característica (Araus & Cairns, 2014).

O ambiente de fenotipagem desempenha um papel vital na qualidade dos dados fenotípicos gerados por experimentos e, conseqüentemente, na eficiência do melhoramento genético. A variação no ambiente aumenta as variâncias de erro, mascarando assim variações genéticas importantes para características-chave e reduzindo a repetibilidade, independentemente do custo e precisão de uma plataforma de fenotipagem. A variação espacial pode ser causada por vários fatores, incluindo o solo, que é inerentemente heterogêneo mesmo em locais experimentais relativamente uniformes (Yang et al., 2020).

3.2.2.3. Uso de sensores para a detecção de doenças em plantas

Os sensores de refletância podem ser categorizados em duas classes distintas: sensores hiperespectrais, capazes de coletar dados de refletância espectral em diversos comprimentos de onda; e sensores multiespectrais, que tendem a abranger menos comprimentos de onda (Lamb, 2000). Esses dispositivos apresentam a capacidade de identificar doenças foliares em diversas culturas, pois cada espécie de planta exibe uma assinatura única de refletância. Durante os últimos 50 anos, uma variedade de índices de vegetação tem sido proposta e estudada para diversas aplicações, abrangendo desde a identificação, quantificação, até a discriminação de estresse hídrico, doenças, pragas e status nutricional. Muitos desses índices têm relevância específica na detecção de doenças em plantas, uma vez que o estresse fisiológico se manifesta por meio de alterações no equilíbrio da composição de pigmentos, tais como carotenoides, clorofilas e xantofilas (Devadas et al., 2021).

O uso eficiente de medições de refletância espectral para detecção de doenças depende da identificação dos comprimentos de onda espectrais mais significativos, altamente correlacionados com uma doença específica. Dependendo da área de aplicação e do objetivo, apenas algumas regiões do espectro são de interesse. Na região do visível (400 a 700 nm), a composição de pigmentos tem um impacto predominante na assinatura espectral (Blackburn & Steele, 1999; Gitelson et al., 2002a). Já o infravermelho próximo (700 a 1100 nm) é principalmente influenciado por características estruturais da folha e conteúdo de água (Jacquemoud & Baret, 1990).

De acordo com os estudos de Bravo et al. (2003), os comprimentos de onda mais eficientes em detectar infecções causadas pela ferrugem amarela do trigo foram: 543 nm, 630 nm, 750 nm e 861 nm, abrangendo as regiões do visível e do infravermelho próximo. Esses comprimentos de onda tiveram um coeficiente de determinação (R^2) de 0,96, e classificou as plantas doentes e saudáveis em nível de campo. No entanto, quando se realizou a fusão de métodos de refletância espectral e método de fluorescência (bandas de 550 e 690 nm) melhorou a discriminação das plantas infectadas pela ferrugem amarela ($R^2 = 0,99$) (Moshou et al., 2005). Tartachnyk et al. (2006) observaram que, tanto a deficiência de nitrogênio a longo prazo, quanto a infecção por ferrugem, resultaram em um

aumento na relação de fluorescência das folhas de trigo em 686 e 740 nm (F_{686}/F_{740}). Esse aumento foi acompanhado por uma redução no teor de clorofila das folhas. Notavelmente, plantas infectadas com ferrugem e cultivadas sob adubação nitrogenada adequada para a cultura tiveram uma variação mais significativa nas leituras espectrais em comparação com aquelas cultivadas sob fornecimento reduzido de nitrogênio.

Estudos já evidenciaram que o índice de refletância de antocianinas (ARI) nas bandas de 550 a 700 nm, e o índice de absorção de refletância de clorofila transformada (TCARI) nas bandas de 550, 670 e 700 nm, podem oferecer um meio de discriminação de espécies de ferrugem do trigo, sendo capazes de separar classes de folhas saudáveis, ferrugem amarela e ferrugem da haste (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*) (Devadas et al., 2009; Fiit et al., 2009). Para o oídio do trigo as bandas espectrais sensíveis para discriminação da doença estão na faixa de 580 a 710 nm (Feng et al., 2016).

3.2.3 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.3.1 Condições experimentais e material vegetal

O ensaio foi conduzido no campo experimental da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, situado na cidade de Campos dos Goytacazes, ao norte do Estado do Rio de Janeiro, Brasil, a 21° 19' 23" de latitude Sul, 41° 19' 40" de longitude Oeste, e altitude média de 14 m. Foram avaliadas 25 famílias $F_{5:6}$ derivadas do cruzamento entre um pimentão e uma pimenta da espécie *C. annuum* var. *annuum* (Tabela 1). O pimentão UENF 2285 foi utilizado como parental feminino, variedade altamente suscetível à antracnose tanto em frutos imaturos quanto maduros. Por outro lado, a pimenta UENF 1381 foi utilizada como parental masculino, já que esta é resistente à antracnose em ambas as fases de desenvolvimento do fruto (Bento et al., 2017). Os tratamentos foram arranjados sob o delineamento em blocos ao acaso, com três repetições e cinco plantas por parcela, distribuídas em fileiras duplas sob o espaçamento de 1,0 m entre fileiras e 0,5 m entre plantas totalizando 405 plantas.

3.2.3.2 Avaliação dos índices de refletância foliares (IRFs)

Neste estudo, os Índices de Vegetação (IRFs) foram obtidos utilizando um mini espectrômetro foliar portátil CI-710 (CID-Bio-Science, Inc., Camas, Washington, USA). Esse equipamento tem a capacidade de medir a transmitância, absorvância e espectros de refletância em uma faixa de comprimento de onda que varia entre 345 e 1040 nm. Para realizar as medições, o espectrômetro utiliza uma combinação de um LED azul e uma lâmpada incandescente como fonte de radiação.

No ensaio, as leituras de refletância foram realizadas configurando o aparelho de acordo com os seguintes parâmetros calibrados: tempo de integração do sinal ajustado para 300 ms, fator de *Integration Time* no valor mais elevado, relação sinal:ruído *Scans Average* 2 e valor 10 para *Boxcar Width* (Janeczko et al., 2018). Foram amostradas duas plantas da parcela e as leituras foram realizadas na porção mediana do lado abaxial das folhas. As avaliações foram repetidas no tempo, com um intervalo aproximado de 15 dias, começando aos 35 dias e terminando aos 120 dias após o florescimento (DAF). O mini espectrômetro foliar disponibiliza 17 índices de refletância, abrangendo diferentes comprimentos de onda. Entretanto, para fins desta pesquisa, foram considerados e avaliados 15 índices específicos (Tabela 6).

Tabela 6. Classificação dos Índices de Refletância Foliar e suas respectivas equações e comprimentos de onda, utilizados no estudo da interação *Capsicum-Colletotrichum*.

Grupo	IRFs	Equação	Comprimento de onda	Referência
Índice de Vegetação	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)	$\frac{(R_{800} - R_{680})}{(R_{800} + R_{680})}$	Vermelho, NIR	(Rouse et al., 1974)
	Índice Transformado da Taxa de Absorção de Clorofila (TCARI)	$3(R_{700} - R_{670}) - 0.2 \cdot (R_{700} - R_{550}) \cdot \left(\frac{R_{700}}{R_{670}}\right)$	Verde, Vermelho, NIR	(Haboudane et al., 2022)
	Índice de Vegetação por diferença Normalizada Cumulativa (CNDVI)	$\frac{(R_{750} - R_{705})}{(R_{750} + R_{705})}$	Vermelho, NIR	(Sun et al., 2011)
	Índice de Verde (G)	$\left(\frac{R_{554}}{R_{677}}\right)$	Verde, Vermelho	(Smith et al., 1995)
Eficiência no Uso da Luz	Índice de Refletância Fotoquímica (PRI)	$\frac{(R_{531} - R_{570})}{(R_{531} + R_{570})}$	Azul, Verde	(Gamon et al., 1992)
	Índice de Refletância de Antocianina 1 (ARI1)	$\left(\frac{1}{R_{550}} - \frac{1}{R_{700}}\right)$	Azul, Vermelho	(Gitelson, 2021)
Índice de Clorofila	Índice de Refletância de Antocianina 2 (ARI2)	$R_{800} \cdot \left(\frac{1}{R_{550}} - \frac{1}{R_{700}}\right)$	Azul, Vermelho, NIR	(Gitelson, 2021)
	Índice de Refletância de Carotenoide 1 (CRI1)	$\left(\frac{1}{R_{510}} - \frac{1}{R_{550}}\right)$	Azul, Verde	(Gitelson et al., 2002b)
	Índice de Refletância de Carotenoide 2 (CRI2)	$\left(\frac{1}{R_{510}} - \frac{1}{R_{700}}\right)$	Azul, Vermelho	(Gitelson et al., 2002b)
	Índice de Banda de Água (WBI)	$\left(\frac{R_{900}}{R_{970}}\right)$	Azul, NIR	(Peñuelas et al., 1997)
Índice de Caratenoide	Índice de Pigmento de Proporção Simples (SIPI)	$\frac{(R_{800} - R_{445})}{(R_{800} - R_{680})}$	Azul, Vermelho, NIR	(Peñuelas et al., 1995)
	Índice de Carter 1 (Ctr1)	$\left(\frac{R_{695}}{R_{420}}\right)$	Azul, Vermelho	(Carter, 1994)
	Índice de Carter 2 (Ctr2)	$\left(\frac{R_{695}}{R_{760}}\right)$	Azul, Vermelho, NIR	(Carter, 1994)
	Índice de Refletância dos Flavonoides (FRI)	$R_{800} \cdot \left(\frac{1}{R_{410}} - \frac{1}{R_{460}}\right)$	Azul, NIR	(Merzlyak et al., 2005)
	Índice de Clorofila Pigmentada Normalizada (NPCl)	$\frac{(R_{680} - R_{430})}{(R_{680} + R_{430})}$	Azul, Vermelho	(Peñuelas, 1994)

3.2.3.3. Características agronômicas e de resistência à antracnose

As características agronômicas utilizadas nesta análise incluíram a produtividade (PRO), o perímetro do fruto (PERf) e a área do fruto (AREf). A produtividade foi estimada com base na produção por parcela e extrapolada para toneladas por hectare ($t.ha^{-1}$), fornecendo uma medida importante da quantidade de frutos obtida por área cultivada. Para determinar o PERf e a AREf, uma amostra composta por cinco frutos de cada planta foi utilizada. Esse valor foi expresso em milímetros (mm) e permitiu uma avaliação precisa do tamanho dos frutos colhidos e da superfície. Para a obtenção dessas medidas, foi utilizado um scanner (Marca Plustek OpticPro A320, Santa Fe Springs, California, EUA). Posteriormente, as imagens RGB (*red*, *green* e *blue*) dos frutos foram processadas utilizando o programa *Tomato Analyzer 4.0* (Ramos et al., 2018). As variáveis de resistências analisadas incluíram a área abaixo da curva da doença - AACPD e o período de incubação de frutos imaturos - PIFI e maduros - PIFM. Um esquema simplificado para a obtenção dessas características é apresentado na Figura 11.

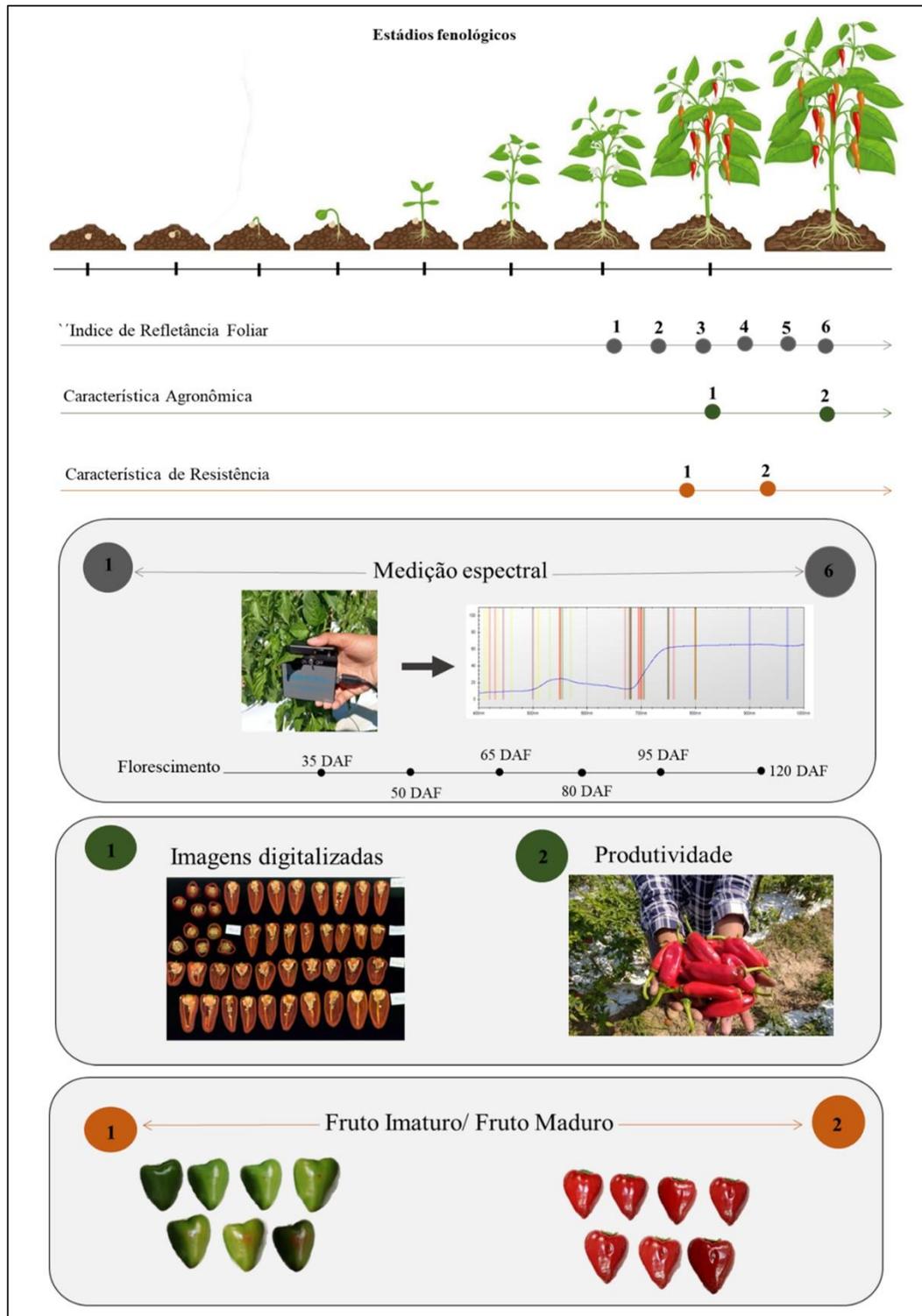


Figura 11. Metodologias para avaliação dos índices de refletância foliar, características agronômicas e de resistência à antracnose em diferentes estádios fenológicos de *Capsicum annum* L. *annuum*. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024

3.2.3.4. Análise estatística

Foram propostas diferentes abordagens estatísticas para investigar as associações entre os IRFs, resistência à antracnose e as características agronômicas, além de estabelecer o melhor período para avaliação dos IRFs:

- I. Análise individual;
- II. Parcela subdividida;
- III. Análise de componentes principais;
- IV. Área abaixo da curva de progresso de refletância foliar;
- V. Correlação de Pearson.

Antes de proceder com as análises, os dados coletados foram submetidos ao teste de homogeneidade de Bartlett para verificar a igualdade das variâncias entre os grupos de dados, e ao teste de normalidade de Lilliefors para avaliar se os dados seguem uma distribuição normal. Verificando-se a igualdade das variâncias e a distribuição normal dos dados, procedeu-se com a análise de variância.

3.2.3.5. Análise de variância individual dos IRFs

Inicialmente foi realizada a análise de variância individual para cada dia de avaliação dos IRFs (35, 50, 65, 80, 95 e 120 DAF) seguindo o modelo linear estatístico abaixo:

$$Y_{ij} = \mu + G_i + B_j + \xi_{ij}, \text{ em que:}$$

Y_{ij} corresponde a observações na parcela com o i -ésimo genótipo no j -ésimo bloco, μ corresponde à média geral; G_i é efeito do i -ésimo genótipo considerado fixo, B_j é o efeito do j -ésimo bloco considerado aleatório e ξ_{ij} é o efeito aleatório associado à observação de ordem ij , que representa o erro ou resíduo não explicado pelas variáveis consideradas no modelo. No modelo descrito, os blocos e o erro [$\xi_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$] são considerados de efeito aleatório e os genótipos [$G_i \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$] são considerados de efeito fixo.

3.2.3.6. Análise de variância dos IRFs: parcela subdividida

Todas as variáveis foram submetidas ao teste de homogeneidade de Bartlett e normalidade de Lilliefors, para verificação do atendimento aos pressupostos da análise de variância (ANOVA). Os IRFs foram analisados no esquema de parcelas subdivididas, tendo como fator principal os 27 genótipos (fator A) e como fator secundário os seis dias de avaliação (fator B) seguindo o modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + B_{lk} + A_i + ea_{ik} + B_j + AB_{ij} + \xi_{ijk}, \text{ em que:}$$

Y_{ijk} corresponde à observação na parcela com o i -ésimo genótipo no j -ésimo dia do k -ésimo bloco; μ representa o efeito da média geral, que é a média de todas as observações na população; B_{lk} é o efeito do bloco k , onde k pode variar de 1 a r , sendo r o número total de blocos. Esse efeito considera as diferenças específicas entre os blocos experimentais; A_i é o efeito do fator genótipo (A) no i -ésimo nível, representando a contribuição específica do genótipo i nas observações; ea_{ik} é o efeito aleatório associado à observação de ordem ijk , representando o erro ou resíduo não explicado pelas variáveis consideradas no modelo; B_j é o efeito do fator tempo (B) no j -ésimo nível, que representa o efeito específico do dia j nas observações; AB_{ij} é o efeito da interação entre o i -ésimo nível de A com o j -ésimo nível de B, considerando a influência conjunta do genótipo e do dia nas observações e ξ_{ijk} é o erro aleatório, representando a variação não explicada nas observações. No modelo descrito, os blocos \sim NID $(0, \sigma^2_b)$ e os erros são considerados de efeitos aleatórios [$\xi_{ijk} \sim$ NID $(0, \sigma^2)$] e os genótipos [$G_i \sim$ NID $(0, \sigma^2)$], os dias e a interação genótipos x dias são considerados de efeitos fixos.

Posteriormente as médias foram agrupadas utilizando o teste de Scott e Knott (1974) com um nível de significância de $p \leq 0,05$. As análises foram executadas utilizando o programa Genes (Cruz, 2016).

3.2.3.7. Análise de Componentes Principais (PCA)

A partir da matriz de correlação genotípica obtida dos 27 genótipos avaliados em seis períodos distintos, entre os 15 IRF, foi realizada a análise de componentes principais (PCA).

Por esse método, um conjunto de n variáveis correlacionadas em um vetor x é transformado em um novo conjunto p de variáveis não correlacionadas, reduzindo a dimensão de p para q . Cada nova variável é uma combinação linear das variáveis originais, a_1x, a_2x, \dots, a_qx , chamadas componentes principais que podem explicar a maior parte da variância total dos dados originais. A variação total das novas variáveis é igual à variação total das variáveis originais e a variância de cada nova variável decresce em ordem, ou seja, de todas as possíveis combinações lineares, q_1 tem maior variância, e entre todas as possíveis combinações lineares não correlacionadas com q_1 , aquela com a maior variância é q_2 , e assim sucessivamente (Jolliffe & Cadima, 2016). O gráfico foi confeccionado utilizando o pacote *ggplot2* do programa R versão 4.1.1.

3.2.3.8. Área abaixo da curva do progresso dos IRFs

A Área abaixo da curva de progresso (AACP) é uma medida amplamente empregada para analisar o desempenho acumulativo de uma característica ao longo do tempo. O cálculo é aplicado em diversas áreas, incluindo estudos de crescimento de plantas, monitoramento de dados ao longo do tempo, análise do progresso de doenças em plantas e outras investigações. Com o objetivo de integrar a variação observada ao longo dos dias de avaliação, fornecendo uma representação resumida do desempenho da característica ao longo do tempo para cada genótipo, utilizou-se o cálculo da AACP para todos os IRF avaliados neste estudo.

3.2.3.9. Análise de correlação

Para investigar a relação entre as características agronômicas, os IRFs (120 DAF), a AACPIRF e a resistência à antracnose, foram realizadas correlações de

Pearson. Essas correlações foram calculadas utilizando a função Pearson do pacote *ggplot2* do programa R versão 4.1.1 (Wickham, 2016). Foram considerados significativos os coeficientes de correlação com p valor inferior a 0,05.

3.2.4. RESULTADOS

3.2.4.1. Variabilidade genética dos IRFs

Foram observadas diferenças significativas com $p \leq 0,01$ para todos os fatores testados. Os genótipos apresentaram diferenças significativas nos índices PRI, NDVI, CNDVI, TCARI, Ctr2 e NPCI. Em relação aos dias de avaliação (35, 50, 65, 80, 95 e 120), apenas o índice Ctr1 não demonstrou diferença significativa. Quanto à interação entre genótipo e DAF (dias após o florescimento), somente os índices TCARI e NPCI mostraram diferença significativa (Tabela 7). Esses resultados indicam que os índices de refletância foliar foram sensíveis o suficiente para distinguir diferentes genótipos, bem como as mudanças ao longo dos dias de avaliação. Os coeficientes de variação experimental do fator A e B variaram de alto e baixo dependendo do índice. Os altos valores já eram esperados, pois as características fisiológicas são afetadas constantemente pelo ambiente.

Tabela 7. Resumo da ANOVA, abrangendo média, coeficiente de variação experimental e coeficiente de determinação genotípica relativos aos 15 índices de refletância foliar (IRFs) avaliados em 25 linhagens de *Capsicum. annuum* L. var. *annuum* e seus parentais.

IRFs	Quadrado Médio						Média	CV (%) A	CV (%) B	H ²
	Bloco (GL= 2)	Genótipo (A) (GL= 26)	Resíduo a (GL= 52)	DAF(B) (GL= 5)	AB (GL= 130)	Resíduo b (GL= 270)				
ARI1	0,000004	0,000001 ^{ns}	0,000001	0,000017 ^{**}	0,000001 ^{ns}	0,000001	0,002	46,59	46,56	26,23
ARI2	0,009757	0,005717 ^{ns}	0,00366	0,070815 ^{**}	0,003104 ^{ns}	0,003567	0,142	42,53	41,99	35,98
CRI1	0,000144	0,000052 ^{ns}	0,000043	0,000232 ^{**}	0,000033 ^{ns}	0,000031	0,028	23,22	19,63	16,91
CRI2	0,000187	0,000059 ^{ns}	0,000053	0,00013 ^{**}	0,000041 ^{ns}	0,000039	0,030	23,80	20,29	10,51
PRI	0,000004	0,000001 ^{ns}	0,000001	0,000017 ^{**}	0,000001 ^{ns}	0,000001	0,002	46,59	46,56	26,23
NDVI	0,003212	0,001786 ^{**}	0,000966	0,009217 ^{**}	0,000621 ^{ns}	0,000667	0,702	4,42	3,67	45,91
CNDVI	0,000259	0,003284 ^{**}	0,00081	0,008339 ^{**}	0,000637 ^{ns}	0,000621	0,308	9,21	0,06	75,33
G	0,176495	0,065511 ^{ns}	0,052071	0,253536 ^{**}	0,027087 ^{ns}	0,028351	2,401	9,50	7,01	20,51
TCARI	63,50483	62,46071 ^{**}	20,151114	114,422 ^{**}	27,71579 ^{**}	21,251408	47,764	9,39	9,65	67,73
WBI	0,055475	0,003077 ^{ns}	0,004042	0,02277 ^{**}	0,001045 ^{ns}	0,00117	1,031	6,16	3,31	0,00
Ctr1	0,083987	0,240501 ^{ns}	0,15807	0,181829 ^{ns}	0,104036 ^{ns}	0,081631	2,685	14,80	10,63	34,27
Ctr2	0,000661	0,003546 ^{**}	0,000852	0,009312 ^{**}	0,000808 ^{ns}	0,000786	0,342	8,51	8,17	75,96
NPCI	0,00465	0,003211 ^{**}	0,001579	0,010625 ^{**}	0,00155 ^{**}	0,00093	0,140	28,23	21,66	50,83
FRI	6,050208	1,277193 ^{ns}	1,326554	4,919119 ^{**}	0,723834 ^{ns}	0,000621	2,195	52,46	34,63	0,00
SIPI	0,00112	0,001215 ^{ns}	0,000881	0,003897 ^{**}	0,000548 ^{ns}	0,000618	0,730	4,05	3,40	27,49

^{ns} não significativo e ^{**} significativo com $p \leq 0,001$ baseado no teste F. GL = Grau de Liberdade; CV (%) A = coeficiente de variação experimental da parcela; CV (%) B = coeficiente de variação experimental da subparcela; H² = coeficiente de determinação genotípico.

Três IRFs foram capazes de distinguir o parental resistente do parental suscetível (PRI, CNDVI e Ctr2), resultando na formação de dois grupos distintos (Figura 12). Em relação aos índices PRI e CNDVI (Figura 12A e 12B), as linhagens em sua maioria e o parental suscetível obtiveram maiores médias, enquanto o parental resistente (UENF 1381) apresentou médias mais baixas. No entanto, para o índice Ctr2 (Figura 12C), foram observadas maiores médias no parental UENF 1381, estabelecendo um padrão diferente em relação aos outros dois índices.

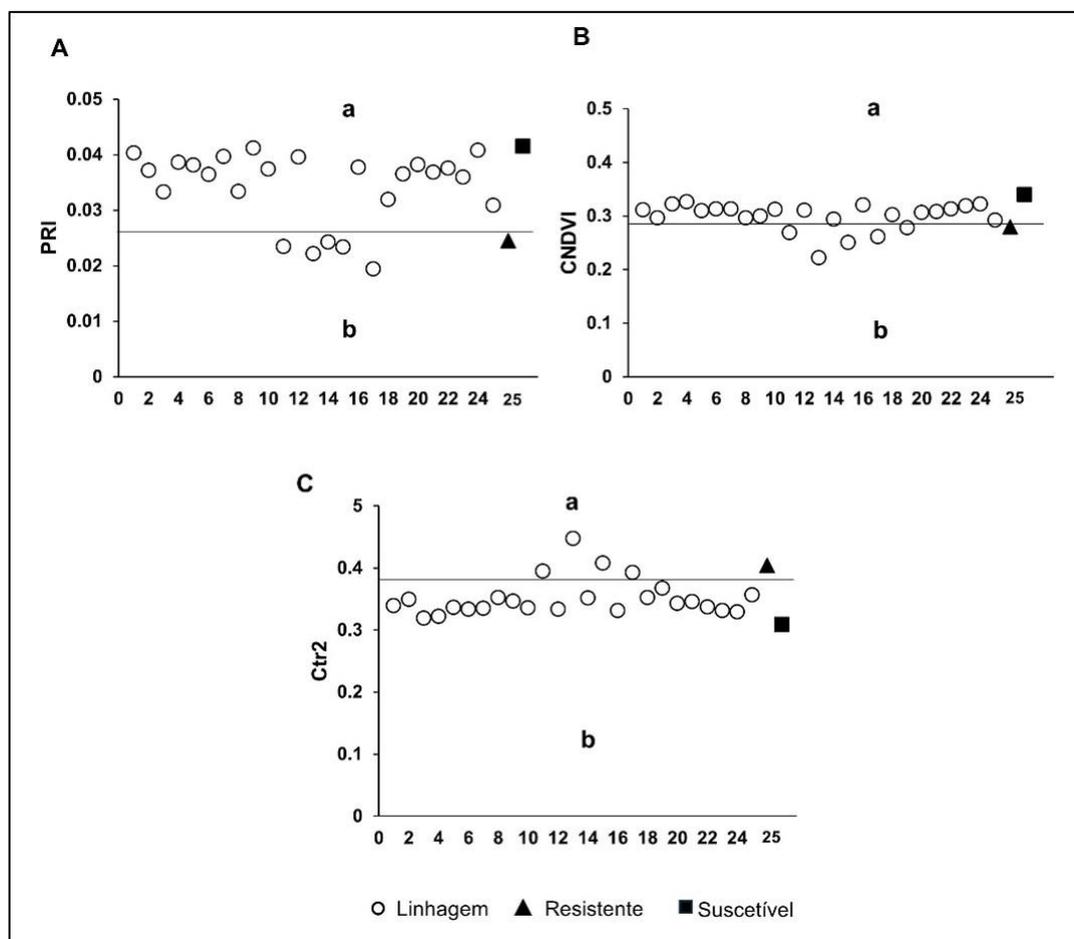


Figura 12. Gráfico de dispersão de médias. A) PRI: índice de refletância fotoquímica; B) CNDVI: índice por diferença normalizada cumulativa e C) Ctr2: índice de Carter 2 de 25 linhagens de *Capsicum annuum* L. var. *annuum* e os respectivos parentais. UENF, Campos do Goytacazes, 2024.

A partir da análise individual dos Índices de Refletância Foliar, observaram-se valores baixos para o coeficiente de determinação genotípica nas duas primeiras

avaliações (35 e 50 dias após o florescimento - DAF) e aos 80 DAF. Os maiores valores de H^2 foram registrados aos 120 DAF, indicando que a maior variabilidade genética é mais bem explicada nos estádios finais de desenvolvimento da planta. Isso sugere que os IRFs podem ser estudados de maneira eficaz em apenas uma única avaliação (Figura 13).

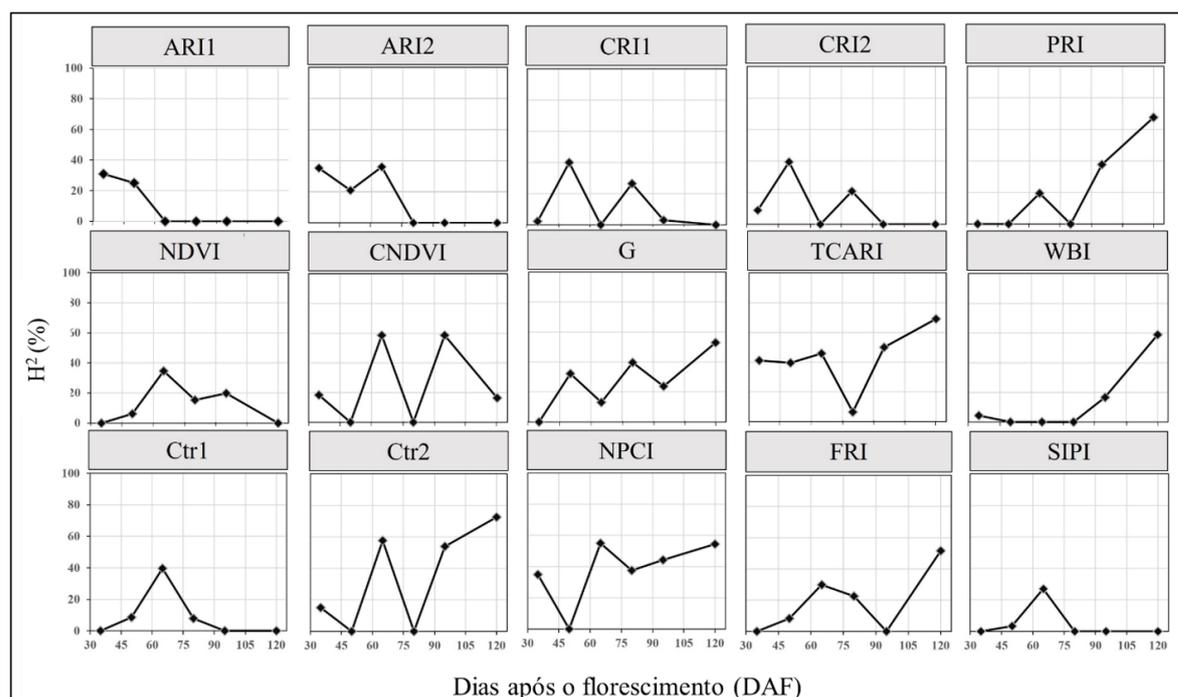


Figura 13. Coeficiente de determinação genotípica (H^2) dos IRFs para dados coletados entre 35 e 120 dias após o florescimento em *C. annuum* L. var. *annuum*. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.

3.2.4.2. Análise de Componentes Principais - PCA

A análise de componentes principais (PCA) foi utilizando os dados de todos os índices de refletância foliar dos genótipos e dos dias após a florescimento avaliados. O primeiro e o segundo componente explicaram, 69,81% e 19,44% da variabilidade total, respectivamente, totalizando 89,25% da variação total (Figura 14).

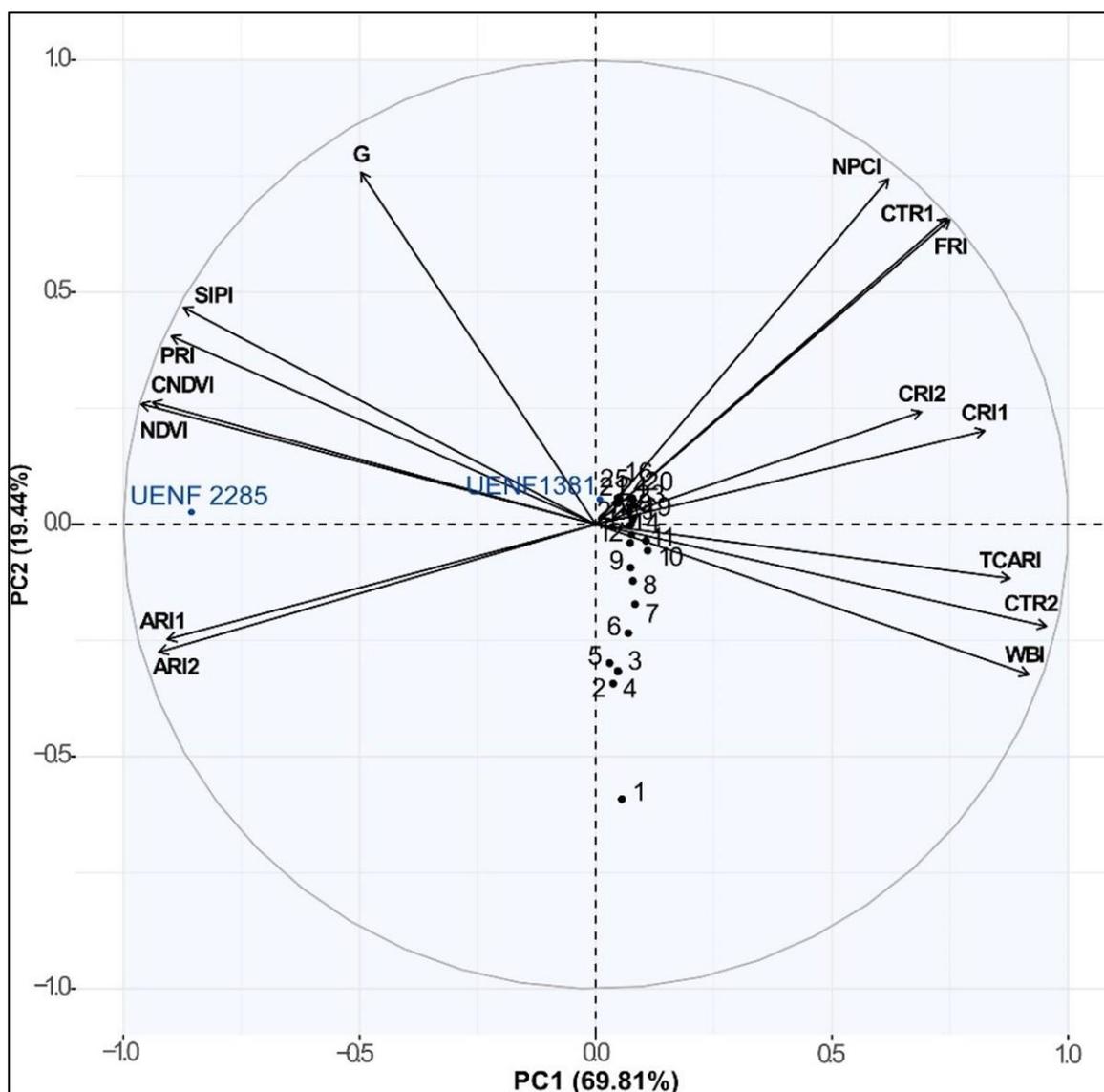


Figura 14. Gráfico Biplot da análise de componentes principais (PCA) utilizando 15 índices de refletância foliar (IRFs) obtidos a partir de seis avaliações de 25 linhagens de *C. annum* L. var. *annuum*, juntamente com seu progenitor resistente. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024

No eixo PC1, oito IRFs (NPCI, CTR1, FRI, CRI1, CRI2, TCARI, CTR2 e WBI) foram agrupados formando ângulos menores que 90 graus, indicando correlação positiva entre si e correlação negativa com os demais índices. A mesma interpretação se aplica para o eixo PC2.

Observou-se que o parental UENF 2285, o único genótipo suscetível, ficou isolado dos demais genótipos pelo agrupamento dos índices G, SIPI, PRI, CNDVI e NDMI (Figura 14). Um segundo grupo foi formado pelo parental resistente UENF 1381 e mais 13 linhagens próximo ao centro do eixo dos componentes. Já o terceiro

grupo, com 12 linhagens ficou mais distante do parental resistente, e os IRFs que mais contribuíram para essa divergência foram TCARI, Ctr2 e WBI. A ordem de importância dos caracteres evidenciou que os IRFs com maior contribuição na diferenciação dos genótipos foram: NDVI, FRI, Ctr1, SIPI, PRI, Ctr2, CNDVI, WBI, NPCI e ARI2.

3.2.4.3. Correlações fenotípicas entre as características de resistência, agronômicas e os índices de refletância foliar

Os resultados da análise de correlação utilizando os dados da área abaixo da curva de progresso (AACP) dos IRFs evidenciaram correlação altamente significativa entre os grupos de características estudadas. Associações mais expressivas foram observadas dentro de cada grupo. No conjunto de características relacionadas a resistência, foram observadas associações positivas apenas entre AACPDFI e AACPDFM, e ambas se associaram negativamente com o PIFM. Este mesmo padrão foi observado ao analisar as associações entre as características de resistência e as características agronômicas (Figura 15). De forma mais específica, notou-se associações positivas entre as características de resistência AACPDFI e AACPDFM com PERf e AREf. No entanto, o PIFM apresentou uma associação negativa com PERf e AREf.

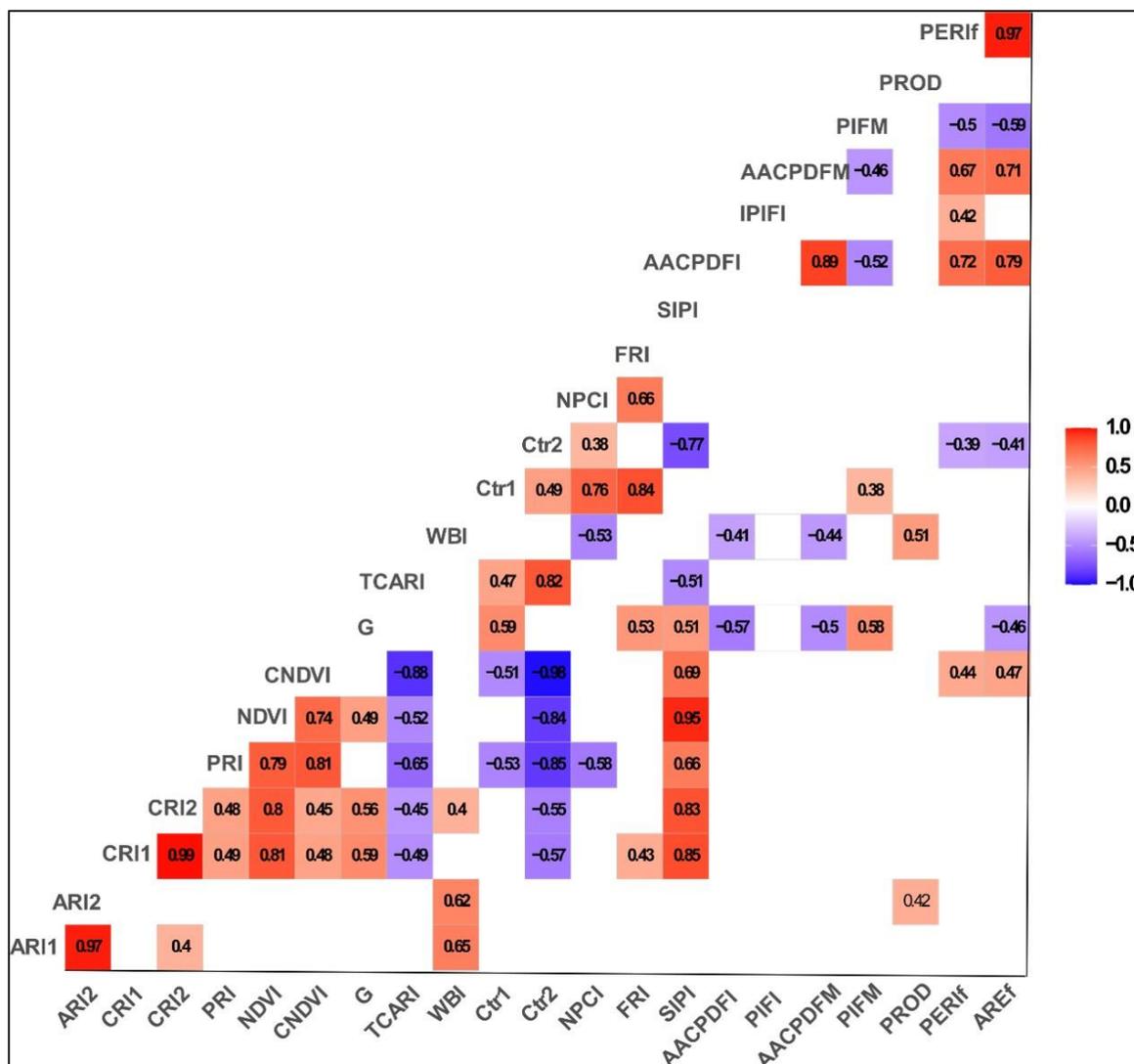


Figura 15. Correlações fenotípicas significativas ($p \leq 0,05$) entre 22 características avaliadas em 25 linhagens de *Capsicum annum* L. var. *annuum* e respectivos parentais utilizando dados da área abaixo da curva de progresso (AACP) dos índices de refletância foliar referentes a seis avaliações. Índices de refletância foliar: ARI1, ARI2, CRI1, CRI2, PRI, NDVI, CNDVI, G, TCARI, WBI, Ctr1, Ctr2, NPCI, FRI e SIPI. Características de resistência: AACPDFI, AACPDFM, PIFI, PIFM. Características agrônômicas: PROD, PERIf e AREf. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024.

Em relação ao conjunto de características da AACP dos IRFs, foram identificadas associações negativas entre G (Índice de Verde) e WBI (Índice de Banda de Água), com AACPDFI e AACPDFM. Além disso, o G teve associação positiva com PIFM, assim como o Ctr2.

Na análise de correlação utilizando os dados coletados aos 120 DAF, os IRFs também evidenciaram correlação altamente significativa entre os grupos de

características estudadas. Em ambas as análises de correlação realizadas foram observadas associações positivas e negativas entre os IRFs e as características agrônômicas (AGRO). O TCARI se associou positivamente com a PROD, o NDVI e o CNDVI positivamente com o PERf e AREf, enquanto o Ctr2, associou-se negativamente com o PERf e AREf. No entanto, apenas o ARI1 se associou positivamente (39%) com uma das características de resistência, o PIFM (Figura 16).

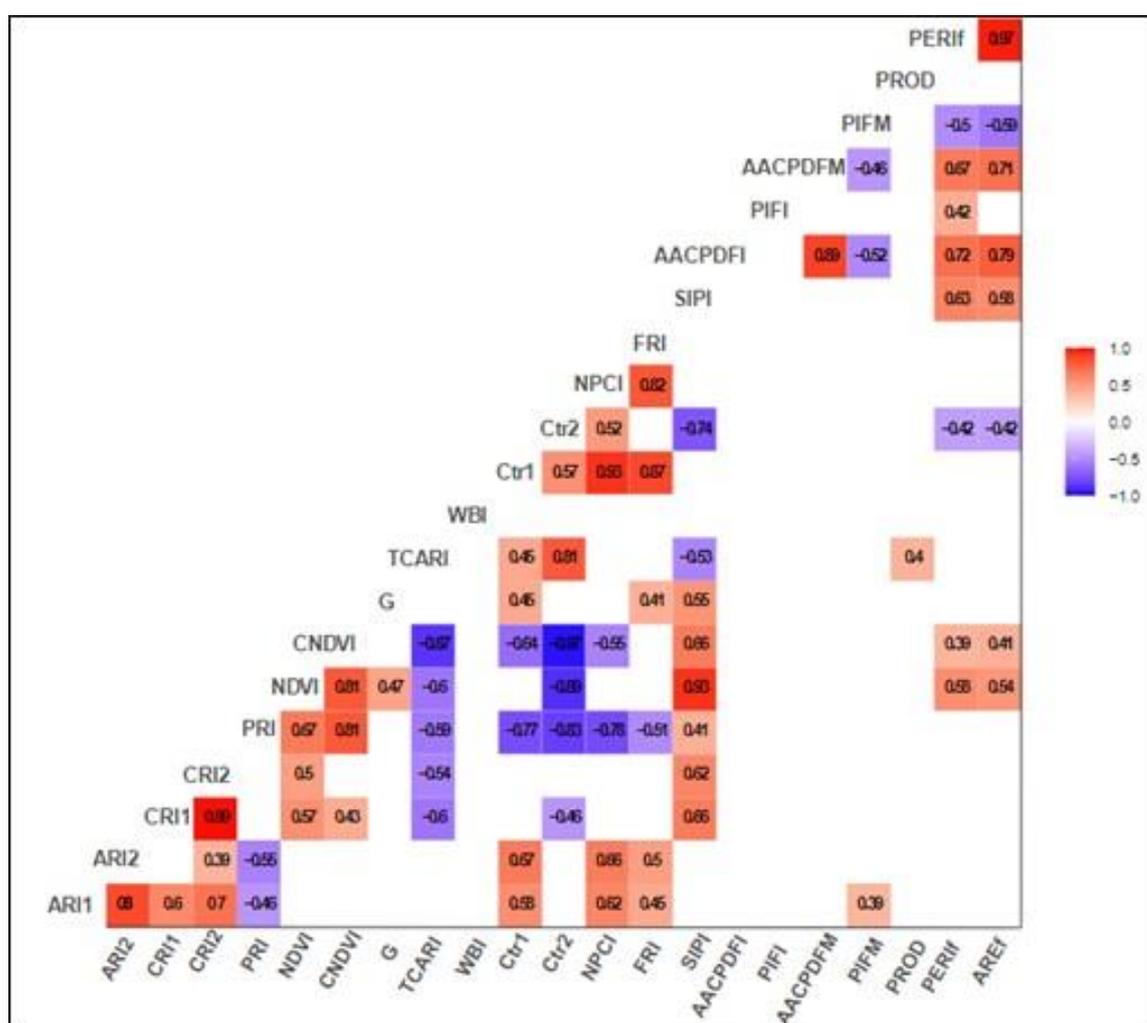


Figura 16. Correlação fenotípica significativas ($p \leq 0,05$) entre 22 características avaliadas em 25 linhagens de *C. annuum* L. var. *annuum* e respectivos parentais utilizando dados de uma única avaliação realizada aos 120 DAF. Índices de refletância foliar: ARI1, ARI2, CRI1, CRI2, PRI, NDVI, CNDVI, G, TCARI, WBI, Ctrl1, Ctrl2, NPCI, FRI e SIPI. Características de resistência: AACPDFI, AACPDFM, PIFI, PIFM. Características agrônômicas: PROD, PERf e AREf. UENF, Campos dos Goytacazes, 2024

3.2.4.4. Protocolo para avaliação dos IRFs

A partir dos resultados obtidos, foi elaborado um protocolo para auxiliar na avaliação e análises dos IRFs:

- I. Melhor período para avaliação dos IRFs: aos 120 dias após o florescimento;
- II. Melhor análise para detectar diferenças entre o parental resistente e o suscetível: análise de componentes principais;
- III. Melhor análise para identificar correlações entre as características de resistência, agronômicas e fisiológicas: correlação de Pearson, para os dados obtidos com o cálculo da área abaixo da curva do progresso dos índices de refletância foliar;
- IV. Índices de refletância foliar promissores para identificar acessos resistentes e suscetíveis: Ctr2, NPCI, FRI, PRI, CNDVI, NDVI e SIPI.

3.2.5. DISCUSSÃO

3.2.5.1. Variabilidade genética dos IRFs

Os índices de refletância foliar PRI, CNDVI e Ctr2 foram capazes de discriminar o parental resistente e o suscetível. Além de distinguirem os parentais, esses três índices possibilitaram o agrupamento das linhagens L11, L13, L14 e L16 juntamente com o parental resistente.

Uma das principais estimativas considerada pelos melhoristas de plantas é a herdabilidade (h^2) ou coeficiente de determinação genotípico (H^2). Esse componente resulta da ação conjunta dos efeitos genéticos, do ambiente e da interação entre estes. Diversos fatores podem afetar as estimativas de h^2 , como por exemplo: a característica, o método de estimação, o tamanho da amostra avaliada, o número e o tipo de ambiente, a unidade experimental considerada e a precisão

na condução do experimento (Borém et al., 2017). Neste estudo, foram obtidos diferentes valores de H^2 para o grupo de características dos IRFs.

Na análise individual, foi possível obter maiores valores de H^2 para os 15 IRFs no estágio de frutificação da planta (120 DAF). Foi observado uma tendência de aumento nos valores do H^2 ao longo do ciclo de crescimento. Essa observação destaca a importância do tempo como um fator significativo na expressão da variabilidade genética associada aos IRFs. A variação genética parece se manifestar de maneira mais proeminente em fases mais avançadas do ciclo de vida da planta, especificamente aos 120 DAF. Este padrão pode ter implicações importantes para estratégias de seleção, sugerindo que uma única avaliação em um estágio mais tardio do desenvolvimento pode fornecer percepções representativas sobre a variabilidade genética relacionada aos IRFs.

Os resultados obtidos por Matias et al. (2022) indicaram maiores valores de herdabilidade (h^2) para os índices de refletância derivados de imagens obtidas por drone em uma população de trigo nos estádios finais de desenvolvimento da planta. Os autores atribuíram esses resultados ao período específico de avaliação. Observaram que, à medida que as estações progrediam, havia um aumento no número de pixels representando a planta, o que influenciou significativamente as análises.

Estes resultados podem ser interpretados como um aumento na resolução e detalhamento das imagens à medida que a planta se desenvolve, permitindo uma captura mais precisa das características relacionadas aos índices de refletância. Com uma resolução mais fina, é possível distinguir características sutis que podem não ser tão evidentes em estádios iniciais de desenvolvimento da planta. Essa observação destaca a importância do melhor período para realização das avaliações, indicando que, em estádios mais avançados do desenvolvimento da planta, as análises baseadas em imagens de VANT e em Índices de Refletância Foliar (IRFs) podem oferecer uma visão mais refinada e confiável das características estudadas. Isso tem implicações significativas para o planejamento de estudos e estratégias de coleta de dados, sugerindo que a escolha do período de avaliação pode afetar a precisão e a utilidade das informações obtidas por meio de tecnologias de sensoriamento remoto.

3.2.5.2. Análise de Componentes Principais - PCA

Por meio da PCA foi possível identificar os índices que tiveram maior contribuição para distinguir as linhagens resistentes do parental suscetível (UENF 2285). Este ficou isolado de todos os demais genótipos pelo agrupamento dos IRFs G, SIPI, PRI, NDVI e CNDVI. Destes, o PRI e o CNDVI também foram relevantes para distinguir os parentais pelo teste de agrupamento de médias Scott-Knott, sendo que as maiores médias foram observadas para o parental suscetível UENF 2285.

O PRI (Índice de Refletância Fotoquímica) está diretamente relacionado à eficiência no uso da luz no ciclo da xantofila das plantas, e por esse motivo pode ser utilizado para monitorar diferentes aspectos da resposta fisiológica da planta a estresses bióticos e abióticos (Bai et al., 2016). Este índice pode variar de -1 a 1 e quanto maior o valor maior é a eficiência do fotossistema II (Saja et al., 2020). Por outro lado, o CNDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Cumulativa) está associado à atividade fotossintética da vegetação, e pode variar de -1 a 1 dependendo de fatores ambientais, como temperatura e umidade, logo que este índice é extremamente sensível a alterações climáticas (Liu et al., 2021).

Os índices NPCI, Ctr1, FRI, CRI1 e CRI2, agruparam o parental resistente UENF 1381 e mais 13 linhagens próximos ao centro dos eixos dos componentes, isso indica que parte da variação observada nos genótipos reside em poucos IRFs, ou em uma combinação de poucos IRFs. O parental suscetível UENF 2285 ficou isolado devido a divergência genética entre o parental resistente e as linhagens. Desta forma, cabe ao melhorista decidir para qual caminho direcionar seu estudo, podendo optar pelo descarte dos caracteres com pouca variação, visto que seu estudo não contribui significativamente a respeito da diferenciação dos genótipos.

Os estudos dos IRFs para a identificação de genótipos resistente ao estresse biótico e abiótico está fundamentado no comprimento de onda de reflectância da planta (Mahlein et al., 2013). Os índices Ctr1, Ctr2 e NPCI, estão diretamente relacionados à proporção de pigmentos fotossintéticos totais em relação à clorofila e fazem parte do grupo de índices de carotenoides (Merzlyak et al., 2005; Peñuelas et al., 1994). Estes são utilizados para estimar o status de nitrogênio (N) das plantas, pois sob condições limitadas de N ocorre a perda de clorofila, resultando em mudanças no espectro de refletância da folha (Peñuelas et al., 1994; Zhao et

al., 2003). O nitrogênio desempenha um papel importante no crescimento das plantas, além de ser essencial para a resistência a doenças. Vale ressaltar que entre os genes de defesa ativados na resistência não hospedeira (RNH) e na resposta de hipersensibilidade (RH), existem alguns associados à produção de proteínas relacionadas à patogênese (PRs), incluindo rotas de biossíntese de compostos contendo nitrogênio (Dallagnol, 2018). É relevante destacar que todo aminoácido possui um grupo amina (NH_2), demonstrando a importância desse elemento (Alves & Felipe, 2020). Assim, esses índices podem ser utilizados para selecionar genótipos de *C. annuum* com maior capacidade de absorver e utilizar o nitrogênio de forma eficiente, o que pode resultar em plantas mais vigorosas e com maior resistência a doenças.

Por outro lado, o TCARI (Razão de Absorção de Clorofila Transformada) é um índice muito sensível à variação da clorofila e muito eficiente em sua estimativa, além de não capturar a refletância de matérias não fotossintéticas. Estudos na cultura do feijão demonstram que o TCARI é um bom índice na estimativa de doenças na folha, pois minimiza os efeitos de refletância de fundo ou do solo em imagens aéreas (Machado et al., 2015). Em relação a aspectos nutricionais da planta, principalmente em relação ao nitrogênio, o TCARI tem uma melhor acurácia comparado a outros índices, principalmente, devido ao uso de borda vermelha para aumentar a estimativa de clorofila, isso porque o aumento da reflexão no infravermelho próximo se deve ao aumento da concentração de nitrogênio nas folhas (Sharifi, 2020).

O índice de refletância de flavonoide (FRI) está relacionado ao conteúdo de clorofila, carotenoide e flavonoide. Os flavonoides fazem parte do metabolismo secundário das plantas e podem desempenhar diversas funções, entre elas as relacionadas a defesa das plantas (Ramaroson et al., 2022). Como um composto de defesa, podem ser divididos em dois grupos: compostos pré-formado e induzido (Treutter, 2006). O envolvimento de flavonoides pré-formados desempenha um importante papel na interação patógeno-hospedeiro. Esses compostos são armazenados em locais estrategicamente importantes, onde podem desempenhar um papel de sinalização direto na defesa (Schlösser, 1993). Já os compostos induzidos são sintetizados pela planta em resposta a lesões físicas, infecção ou estresse. Eles também podem ser sintetizados constitutivamente, mas sua biossíntese é melhorada sob o efeito de vários tipos de estresse, ou podem ocorrer

como as fitoalexinas, somente após a infecção ou vários tipos de estresse (Treutter, 2006). Esses resultados sugerem que esses IRFs têm potencial para serem utilizados como ferramentas para seleção de genótipos mais resistentes à antracnose, para tanto mais estudos são necessários.

3.2.5.3. Correlações fenotípicas entre as características de resistência, agronômicas e os índices de refletância foliar

A análise de correlação simples permitiu identificar associações positivas e negativas entre os diferentes grupos de características. As associações positivas entre os IRFs sugerem que as plantas que compartilham características semelhantes nesses parâmetros espectrais também tendem a ter perfis fisiológicos semelhantes. A associação positiva entre as características de resistência e algumas características agronômicas sugerem a possibilidade de seleção indireta de genótipos que apresentem um desempenho robusto em ambos os aspectos, contribuindo para o desenvolvimento de cultivares mais resistentes e agronomicamente vantajosas (Borém et al., 2017). Esses padrões de correlação são fundamentais para a compreensão das relações mistas entre as características estudadas, informando estratégias mais eficazes de seleção no contexto do melhoramento de plantas (Borém et al., 2017).

O índice Ctr1, assim como o Ctr2, está diretamente relacionado à proporção de pigmentos fotossintéticos totais em relação à clorofila e fazem parte do grupo de índices de carotenoides (Merzlyak et al., 2005; Peñuelas et al., 1994). Esse índice se relacionou significativamente com as variáveis de resistência PIFM, enquanto o G e o WBI associaram negativamente, ou seja, quanto maior o teor de verde e de água menor a AACPDFI e AACPDFM e maior o PI, assim maior resistência à antracnose.

Ressaltando a análise de correlação dos IRFs aos 120 dias, apenas o ARI1 se associou positivamente com a variável de resistência PIFM. Esse índice está relacionado ao conteúdo de antocianinas. As antocianinas são formadas pela rota dos fenilpropanóides, ou seja, são derivadas da fenilalanina amônia-liase (PAL) envolvida na resistência de plantas (Wang et al., 2019). O valor do ARI1 pode variar de 0 a 2, quanto maior o seu valor maior quantidade de antocianinas nas plantas e, conseqüentemente, maior a resistência.

A ausência de correlações com altas magnitudes entre os IRFs e as características de resistência pode ser atribuída à complexidade dessas características e a natureza de estimação. A avaliação dos IRF é realizada nas folhas utilizando um sensor fornecendo informações sobre o estado fisiológico da planta. Por outro lado, a avaliação de resistência é realizada nos frutos por meio de escala de nota. A divergência entre os métodos de avaliação fisiológico e de resistência pode ter contribuído para a baixa correlação. Já foi constatado que a resistência à antracnose é conferida por múltiplos genes e fatores (Giacomin et al., 2020), tornando a relação entre os IRFs e essas características mais complexa.

3.2.6. CONCLUSÕES

Quanto ao estágio fenológico dos genótipos de *C. annuum* L. var. *annuum*, a avaliação dos índices de refletância aos 120 dias foi mais confiável, uma vez que neste período a herdabilidade foi maior.

Os índices de refletância foliar PRI, CNDVI e Ctr2 se destacaram como eficazes na distinção de genótipos resistentes e suscetível. Já os índices ARI1 e Ctr1 podem ser excluídos devido à alta correção com outros índices. Os índices com maior contribuição na diferenciação dos genótipos resistente e suscetível foram NDVI, FRI, SIPI e PRI.

Tanto a AACP dos IRFs, quanto a utilização de dados coletados aos 120 DAF, mostraram-se estratégias úteis no programa de melhoramento de *C. annuum* L. var. *annuum* visando resistência à antracnose, resultando em uma metodologia não destrutiva para acelerar as etapas de seleção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrios, G. N. (2005). *Plant pathology*, 5th ed. (p. 635). San Diego, CA: Academic Press.
- Alencar, A. A. S. (2022). Interação planta-patógeno em *Capsicum annuum* var. *annuum*: melhoramento genético visando à resistência à antracnose (*Colletotrichum scovillei*) e identificação de proteínas relacionadas à defesa no patossistema *Capsicum* x *Xanthomonas*. Tese, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
- Ali, A., Bordoh, P. K., Singh, A., Siddiqui, Y., & Droby, S. (2016). Post-harvest development of anthracnose in pepper (*Capsicum* spp): Etiology and management strategies. *Crop Protection*, 90, 132–141.
- Allard, R. N. (1971). *Princípios do melhoramento genético de plantas*. Rio de Janeiro: USAID. 381p.
- Almeida, C. L. P., Bento C. S., Sudré, C. P., Pimenta, S., Gonçalves, L. S. A., Rodrigues, R. (2020). Genotype-Ideotype distance index and multivariate analysis to select sources of anthracnose resistance in *Capsicum* spp. *European Journal of Plant Pathology*, 156(1): 223-236.
- Alves, A. F., & Felipe, C. F. B. (2020). AminoViewer. *Revista digital. Universidade Federal da Paraíba*. Paraíba.

- Araújo, M. D. S. B., Sudré, C. P., da Silva Alencar, A. A., Cavalcanti, T. F. M., de Almeida, C. L. P., & Rodrigues, R. (2023). The state-of-the-art in the genetics of resistance to the *Colletotrichum* species complex in *Capsicum*. *Revisão anual de Patologia de Planta*, 29.
- Araújo, M. S. B. (2020). Associação do método genealógico e modelagem mista no melhoramento de *Capsicum annuum* var. *annuum* para resistência à antracnose e atributos produtivos e mapeamento de novos genes de resistência à mancha bacteriana. Tese, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
- Araújo, M. S. B., Sudré, C. P., Graça, G. A., Alencar, A. A. S., Geronimo, I. G. C. & Rodrigues, R. (2022). A new approach to quantify anthracnose symptoms in inoculated *Capsicum* spp. fruits. *Tropical Plant Pathology*, 47:386–401.
- Araus, J. L., & Cairns, J. E. (2014). Field high-throughput phenotyping: the new crop breeding frontier. *Trends in plant science*, 19(1): 52-61.
- Araus, J. L., & Kefauver, S. C. (2018). Breeding to adapt agriculture to climate change: affordable phenotyping solutions. *Current opinion in plant biology*, 45, 237-247.
- Araus, J. L., Kefauver, S. C., Zaman-Allah, M., Olsen, M. S., & Cairns, J. E. (2018). Translating high-throughput phenotyping into genetic gain. *Trends in plant science*, 23(5): 451-466.
- Baba, V.Y., Rocha, K.R., Gomes, G.P., de Fátima Ruas, C., Ruas, P.M., Rodrigues, R., Gonçalves, L.S.A. (2016) Genetic diversity of *Capsicum chinense* accessions based on fruit morphological characterization and AFLP markers. *Genet. Resour. Crop Evol.* 63, 1371-1381.
- Bai, G., Ge, Y., Hussain, W., Baenziger, P. S., & Graef, G. (2016). A multi-sensor system for high throughput field phenotyping in soybean and wheat breeding. *Computers and Electronics in Agriculture*, 128, 181-192.
- Barka, G. D., & Lee, J. (2020). Molecular marker development and gene cloning for diverse disease resistance in pepper (*Capsicum annuum* L.): Current status and prospects. *Plant breeding and biotechnology*, 8(2): 89-113.

- Bateson, W. (1907). Facts limiting the theory of heredity. *Science*, 26(672): 649-660.
- Bento, C. S., De Souza, A. G., Sudré, C. P., Pimenta, S., & Rodrigues, R. (2017). Multiple genetic resistances in *Capsicum* spp. *Genet. Mol. Res*, 16(3), 16039789.
- Bianchi, P. A. (2021). Genetic mapping, QTLs and RNA-seq: combining approaches in identifying resistance genes for fungal diseases in pepper. Tese, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
- Blackburn, G. A., & Steele, C. M. (1999). Towards the remote sensing of matorral vegetation physiology: Relationships between spectral reflectance, pigment, and biophysical characteristics of semiarid bushland canopies. *Remote Sensing of Environment*, 70, 278–292.
- Bock C. H., Barbedo J. G. A., Del Ponte E. M., Bohnenkamp, D., Mahlei A. K. (2020). From visual estimates to fully automated sensor-based measurements of plant disease severity: Status and challenges for improving accuracy. *Phytopathology Research* 2:9.
- Borém, A., Miranda, G. V., Fritsche-Neto, R. (2017). *Melhoramento de Plantas - Borém* - Editora UFV, 7th ed. Viçosa: Editora UFV.
- Bosland, P. W., Votava, E. J. (2012). Peppers: vegetable and spice Capsicums, Wallingford: *CABI Publishing (Crops Production Science in Horticulture)* 22, 224 p.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) 2023, disponível em: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/agrotoxicos/programa-de-analise-de-residuos-em-alimentos>. Acessado fevereiro de 2024.
- Bravo, C., Moshou, D., West, J., McCartney, A., & Ramon, H. (2003). Early disease detection in wheat fields using spectral reflectance. *Biosystems Engineering*, 84(2): 137–145.
- Campbell, C. L., Madden, L. M. (1990) *Introduction to plant disease epidemiology*. New York. John Wiley Sons.

- Carena, M. J. (2021). Germplasm enhancement and cultivar development: the need for sustainable breeding. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 21.
- Carrizo García, C., Barfuss, M. H., Sehr, E. M., Barboza, G. E., Samuel, R., Moscone, E. A., & Ehrendorfer, F. (2016). Phylogenetic relationships, diversification and expansion of chili peppers (*Capsicum*, Solanaceae). *Annals of botany*, 118(1), 35-51.
- Carter, G. A., & Miller, R. L. (1994). Early detection of plant stress by digital imaging within narrow stress-sensitive wavebands. *Remote sensing of environment*, 50(3): 295-302.
- Cassaro, S. (2022). Ensaio para proteção de cultivares do tipo linha pura de *Capsicum baccatum* var. *pendulum* resistentes ao *Pepper Yellow Mosaic Virus*, Ano de obtenção. Tese, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
- Chapa-Oliver, A. M., Mejía-Teniente, L. (2016). Capsaicin: from plants to a cancersuppressing agent. *Molecules*, 21(8), 931.
- Cherene, M. B., Taveira, G. B., Almeida-Silva, F., da Silva, M. S., Cavaco, M. C., da Silva-Ferreira, A. T., Gomes, V. M. (2023). Structural and Biochemical Characterization of Three Antimicrobial Peptides from *Capsicum annum* L. var. *annuum* Leaves for Anti-Candida Use. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*, 1-18.
- Chiang K. S., Bock, C. H., El Jarroudi, M., Delfosse, P., Lee, I. H., Liu, H. I. (2016). Effects of rater bias and assessment method on disease severity estimation with regard to hypothesis testing. *Plant Pathology*, 65:523–535.
- Cruz, C. D. (2016) Genes Software-extended and integrated with the R, Matlab and Selegen. *Acta Scientiarum. Agronomy*. 38, 547-552.
- Dallagnol, L. J. Resistência Genética de Plantas a Patógenos. (2018). 1st ed. Pelotas: UFPel.
- De Silva, Dilani D., Groenewald, J. Z., Crous, P. W., Ades, P. K., Nasruddin, A., de Vallavieille-Pope, C., Giosue, S., Munk, L., Newton, A., Niks, R., Østergård, H., ... & Sache, I. (2000). Assessment of epidemiological parameters and their use

in epidemiological and forecasting models of cereal airborne diseases. *Agronomie*, 20(7): 715-727.

de Vienne, D. (2022). What is a phenotype? History and new developments of the concept. *Genetica*, 150(3): 153-158.

Derera, N. F. (2000). Condiment Paprika: Breeding, Harvesting and Commercialization: a Report for the Rural Industries Research and Development Corporation. *RIRDC publication*, p. 155.

Devadas, R., Lamb, D. W., Simpfendorfer, S., & Backhouse, D. (2009). Evaluating ten spectral vegetation indices for identifying rust infection in individual wheat leaves. *Precision Agriculture*, 10, 459-470.

El-Kott, A.F., Bin-Meferij., M.M. (2018). Suppressive effects of capsaicin against Nitrosomethylurea-induced mammary tumorigenesis in rats. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 98, 673-679.

Feltrin Sementes, disponível em: <https://loja.sementesfeltrin.com.br/pimenta/pimenta-maria-bonita-contem-15-sementes>, Acessado em fevereiro de 2024.

Feng, W., Shen, W., He, L., Duan, J., Guo, B., Li, Y., . & Guo, T. (2016). Improved remote sensing detection of wheat powdery mildew using dual-green vegetation indices. *Precision agriculture*, 17, 608-627.

Filella, I., & Penuelas, J. 1. (1994). The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass, and hydric status. *International journal of remote sensing*, 15(7): 1459-1470.

Fitt, B. D., McCartney, H. A., & West, J. S. (2006). Dispersal of foliar plant pathogens: mechanisms, gradients and spatial patterns. *The epidemiology of plant diseases*, 159-192.

Gamon, J., Serrano, L., & Surfus, J. S. (1997). The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, 112, 492-501.

- Genovese, G., Vignolles, C., Nègre, T., & Passera, G. (2001). A methodology for a combined use of normalised difference vegetation index and CORINE land cover data for crop yield monitoring and forecasting. A case study on Spain. *Agronomie*, 21(1): 91-111.
- Geronimo, I. G. C. (2018). Melhoramento de *Capsicum annuum* visando resistência à antracnose: caracterização de isolados de *Colletotrichum* spp., herança da resistência e proposta de série diferenciadora. Tese, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
- Giacomin, R. M., de Fátima Ruas, C., Baba, V. Y., De Godoy, S. M., Sudré, C. P., dos Santos Bento, C., Gonçalves, L. S. (2021). Phenotypic, molecular and pathogenic characterization of *Colletotrichum scovillei* infecting *Capsicum* species in Rio de Janeiro, Brazil. *PeerJ*, 9: e10782.
- Giacomin, R. M., Ruas, C. D. F., Moreira, A. F. P., Guidone, G. H. M., Baba, V. Y., Rodrigues, R., & Gonçalves, L. S. A. (2020). Inheritance of anthracnose resistance (*Colletotrichum scovillei*) in ripe and unripe *Capsicum annuum* fruits. *Journal of Phytopathology*, 168(3): 184-192.
- Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N., & Chivkunova, O. B. (2001). Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and photobiology*, 74(1): 38-45.
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002a). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80, 76–87.
- Gitelson, A. A., Zur, Y., Chivkunova, O. B., & Merzlyak, M. N. (2002b). Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. *Photochemistry and photobiology*, 75(3): 272-281.
- Gjuvsland, A. B., Vik, J. O., Beard, D. A., Hunter, P. J., & Omholt, S. W. (2013). Bridging the genotype–phenotype gap: what does it take?. *The Journal of physiology*, 591(8), 2055-2066.
- Gonçalves, L. S., Gomes, V. M., Robaina, R. R., Valim, R. H., Rodrigues, R., & Aranha, F. M. (2014). Resistance to root-knot nematode (*Meloidogyne*

- enterolobii) in *Capsicum* spp. accessions. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 9(1): 49-52.
- González, A. M., Marcel, T. C., & Niks, R. E. (2012) Evidence for a minor gene-for-minor gene interaction explaining nonhypersensitive polygenic partial disease resistance. *Phytopathology*, 102(11), 1086-1093.
- González-Pérez, S., Garcés-Claver, A., Mallor, C., Sáenz De Miera, L. E., Fayos, O., Pomar, F., & Silvar, C. (2014). New insights into *Capsicum* spp relatedness and the diversification process of *Capsicum annuum* in Spain. *PLoS ONE*, 9 (12), 1–23.
- Gracia-Romero, A., Vergara-Díaz, O., Thierfelder, C., Cairns, J. E., Kefauver, S. C., & Araus, J. L. (2018). Phenotyping conservation agriculture management effects on ground and aerial remote sensing assessments of maize hybrids performance in Zimbabwe. *Remote Sensing*, 10(2), 349.
- Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P. J., & Dextraze, L. (2002). Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote sensing of environment*, 81(2-3): 416-426.
- Harp, T., Kuhn, P., Roberts, P. D., e Pernezny, K. L. (2014). Management and crossinfectivity potential of *Colletotrichum acutatum* causing anthracnose on bell pepper in Florida. *Phytoparasitica*, 42(1): 31–39.
- Heim, R. H. J., Wright, I. J., Allen, A. P., Geedicke, I., & Oldeland, J. (2019). Developing a spectral disease index for myrtle rust (*Austropuccinia psidii*). *Plant Pathology*, 68(4), 738-745.
- Hickey, L. T. N., Hafeez, A., Robinson, H., Jackson, S. A., Leal-Bertioli, S. C. M., Tester, M., Gao, C., Godwin, I. D., Hayes, B. J, Wulff, B. B. H. (2019). Breeding crops to feed 10 billion. *Nat Biotechnol.* 37 (7):744-754.
- IBGE, Censo agropecuário de 2017, disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario2017>, pdf, Acessado em dezembro de 2023.

- Ince, A. G., Karaca, M., & Onus, A. N. (2010). Genetic relationships within and between *Capsicum* species. *Biochemical genetics*, 48, 83-95.
- Isla Sementes, disponível em: <https://www.isla.com.br/produto/pimentao-mini-hibrido-kaiki/961>, Acessado em fevereiro de 2024.
- Jacquemoud, S., & Baret, F. (1990). Prospect: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, 34, 75–91.
- Janeczko, A., Dziurka, M., Gullner, G., Kocurek, M., Rys, M., Saja, D., & Barna, B. (2018). Comparative studies of compatible and incompatible pepper–Tobamovirus interactions and the evaluation of effects of 24-epibrassinolide. *Photosynthetica*, 56, 763-775.
- Johannsen, W. (1911). The genotype conception of heredity. *The American Naturalist*, 45(531), 129-159.
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical transactions of the royal society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065): 20150202.
- Justino, E. V., Fonseca, M. N., Ferreira, M. E., Boiteux, L. S., Silva, P. P., Nascimento, W.M. (2018). Estimate of natural cross-pollination rate of *Capsicum annuum* using a codominant molecular marker associated with fruit pungency, *Genetics and Molecular Research*, 17(1).
- Kalaivani, S., Shantharajah, S. P., & Padma, T. (2020). Agricultural leaf blight disease segmentation using indices-based histogram intensity segmentation approach. *Multimedia Tools and Applications*, 79, 9145-9159.
- Kenyon, L., Kumar, S., Tsai, W. S., & Hughes, J. D. A. (2014). Virus diseases of peppers (*Capsicum* spp.) and their control. In *Advances in virus research*. Academic Press, 90, 297-354.
- Kim, S. H., Yoon, J. B., Do, J. W., & Park, H. G. (2008). A major recessive gene associated with anthracnose resistance to *Colletotrichum capsici* in chili pepper (*Capsicum annuum* L.). *Breeding Science*, 58(2): 137–141.

- Lamb, D. W. (2000). The use of qualitative airborne multispectral imaging for managing agricultural crops-a case study in south-eastern Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 40(5): 725-738.
- Lin, Q., Kanchana-udomkarn, C., Jaunet, T., Mongkolporn, O. (2002). Genetic analysis of resistance to pepper anthracnose caused by *Colletotrichum capsici*. *Thai journal of Agricultural science*, 35(3): 259-264.
- Liu, F., Tang, G., Zheng, X., Li, Y., Sun, X., Qi, X., & Gong, G. (2016). Molecular and phenotypic characterization of *Colletotrichum* species associated with anthracnose disease in peppers from Sichuan Province, China. *Scientific reports*, 6(1), 32761.
- Liu, R., Song, Y., Liu, Y., Li, X., Song, H., Sun, C., & Wang, L. (2021). changes in the tree-ring width-derived cumulative Normalized Difference Vegetation Index over northeast China during 1825 to 2013 CE. *Forests*, 12(2): 241.
- Lozada, D. N., Godoy, J. V., Ward, B. P., & Carter, A. H. (2019). Genomic prediction and indirect selection for grain yield in US Pacific northwest winter wheat using spectral reflectance indices from high-throughput phenotyping. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(1), 165.
- Machado, M. L., Pinto, F. A., de Queiroz, D. M., de Paula Jr, T. J., & Vieira, R. F. (2015). Estimative of white mold severity in common bean crops using hyper and multispectral sensors/Estimativa de severidade do mofo-branco em lavouras de feijao utilizando-se sensores hiper e multiespectral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(5): 426-433.
- Mahasuk, P., Khumpeng, N., Wasee, S., Taylor, P. W. J., & Mongkolporn, O. (2009a). Inheritance of resistance to anthracnose (*Colletotrichum capsici*) at seedling and fruiting stages in chili pepper (*Capsicum* spp.). *Plant Breeding*, 128(6): 701–706.
- Mahasuk, P., Taylor, P. W. J e Mongkolporn O (2009b). Identification of two new genes conferring resistance to *Colletotrichum acutatum* in *Capsicum baccatum*. *Phytopathology*. 99: 1100-1104.

- Mahlein, A. K., Rumpf, T., Welke, P., Dehne, H. W., Plümer, L., Steiner, U., & Oerke, E. C. (2013). Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. *Remote Sensing of Environment*, 128, 21-30.
- Matias, F. I., Green, A., Lachowiec, J. A., LeBauer, D., & Feldman, M. (2022). Bison-Fly: An open-source UAV pipeline for plant breeding data collection. *The Plant Phenome Journal*, 5(1): 20048.
- Mendel, G. J., (1866) Versuche über Pflanzen-Hybriden. Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn, IV, pp 3–47.
- Merzlyak, M. N., Gitelson, A. A., Chivkunova, O. B., & Rakitin, V. Y. (1999). Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia plantarum*, 106(1): 135-141.
- Merzlyak, M. N., Solovchenko, A. E., Smagin, A. I., & Gitelson, A. A. (2005). Apple flavonols during fruit adaptation to solar radiation: spectral features and technique for non-destructive assessment. *Journal of plant physiology*, 162(2): 151-160.
- Miller-Butler, M. A., Smith, B.J., Curry, K.J., Blythe, E. K. (2019). Evaluation of detached strawberry leaves for anthracnose disease severity using I mage analysis and visual ratings. *HortScience*, 54:2111–2117
- Mishra R, Rout E, Joshi RK (2019). Identification of Resistant Sources Against Anthracnose Disease Caused by *Colletotrichum truncatum* and *Colletotrichum gloeosporioides* in *Capsicum annum* L. *Proceedings National Academy Science India - Biological Science*, 89:517–524.
- MLA style: The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2021. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2024. Mon. 5 Feb 2024. <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/2021/summary/>. Acessado em fevereiro de 2024.
- Mongkolporn O, Montri P, Supakaew T, Taylor PWJ (2010). Differential Reactions on Mature Green and Ripe Chili Fruit Infected by Three *Colletotrichum* spp. *Plant Disase*, 94:306–310.

- Mongkolporn, O., & Taylor, P. W. J. (2018). Chili anthracnose: *Colletotrichum* taxonomy and pathogenicity. *Plant Pathology*, 67(6): 1255-1263.
- Mongkolporn, O., & Taylor, P. W. J. (2019). Identification, prevalence and pathogenicity of *Colletotrichum* species causing anthracnose of *Capsicum annuum* in Asia. *IMA Fungus*, 10(1): 1–32.
- Montri, P., Taylor, P. W. J., Mongkolporn, O. (2009). Pathotypes of *Colletotrichum capsici*, the causal agent of chili anthracnose, in Thailand. *Plant Disease*, 93:17–20.
- Moreira, S. O., Rodrigues, R., Araújo, M. L. D., Riva-Souza, E. M., Oliveira, R. L. D. (2010). Agronomic performance of recombinant inbred of *Capsicum annuum* L. lines cultivated under organic system and greenhouse conditions. *Ciência e agrotecnologia*, 34: 886-891.
- Morgan, T. H. (1910). Sex limited inheritance in *Drosophila*. *Science*, 32(812): 120-122.
- Moshou, D., Bravo, C., Oberti, R., West, J., Bodria, L., McCartney, A. (2005). Plant disease detection based on data fusion of hyper-spectral and multi-spectral fluorescence imaging using Kohonen maps. *Real-Time Imaging*, 11(2): 75–83.
- Moulin, M. M., Rodrigues, R., Ramos, H. C. C., Bento, C. S., Sudré, C. P., Gonçalves, L. S. A., Viana, A. P. (2015). Construction of an integrated genetic map for *Capsicum baccatum* L. *Genet Mol Res*, 14: 6683–6694.
- Mulamba N. N. e Mock J. J. (1978) Improvement of yield potential of the Eto Blanco maize (*Zea mays* L.) population by breeding for plant traits. *Egyptian Journal of Genetics and Cytology*, 7:40-51.
- Nagel, K. A., Putz, A., Gilmer, F., Heinz, K., Fischbach, A., Pfeifer, J., Faget, M., Blossfeld, S., Ernst, M., Dimaki, C., Kastenholz, B., Kleinert, A.-K., Galinski, A., Scharr, H., Fiorani, F., Schurr, U., Growscreen-Rhizo. (2012). Is a novel phenotyping robot enabling simultaneous measurements of root and shoot growth for plants grown in soil-filled rhizotrons. *Functional Plant Biology*. 39: 891-904.

- Natarajan, S., Basnayake, J., Wei, X., & Lakshmanan, P. (2019). High-throughput phenotyping of indirect traits for early-stage selection in sugarcane breeding. *Remote Sensing*, 11(24), 2952.
- Nick, C. & Borém, A. (2016). *Pimentão: do plantio à colheita*, 1a. Viçosa: EDITORA UFV.
- Nunes, J. A. R., Moreto, A. L., & Ramalho, M. A. P. (2008). Using Genealogy To Improve Selection Efficiency of Pedigree Method. *Scientia Agricola*, 65, 25–30.
- Oliveira, H. S. (2013). Método genealógico e modelos mistos na seleção de linhas segregantes de *Capsicum baccatum* var. *pendulum*. Tese, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro.
- Onus, A. N., Pickersgill, B. (2004). Unilateral incompatibility in *Capsicum* (Solanaceae): occurrence and taxonomic distribution. *Ann Bot*, 94:289–295.
- Pakdeevaporn, P., Wasee, S., Taylor, P. W. J., e Mongkolporn, O. (2005). Inheritance of resistance to anthracnose caused by *Colletotrichum capsici* in *Capsicum*. *Plant Breeding*, 124(2): 206-208.
- Park, S., Jeong, W. Y., Lee, J. H., Kim, Y. H., Jeong, S. W., Kim, G. S., Bae, D. W., Lim, C. S., Jin, J. S., Lee, S. J., Shin, S. C. (2012). Determination of Polyphenol Levels Variation in *Capsicum annuum* L. cv. Chelsea (yellow bell pepper) infected by anthracnose (*Colletotrichum gloeosporioides*) using liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Food chemistry*. 130:981-985.
- Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Serrano, L., & Save, R. (1993). The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. *International journal of remote sensing*, 14(10): 1887-1905.
- Peñuelas, J., Gamon, J. A., Fredeen, A. L., Merino, J., & Field, C. B. (1994). Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen-and water-limited sunflower leaves. *Remote sensing of Environment*, 48(2): 135-146.
- Peñuelas, J., Filella, I., & Gamon, J. A. (1995). Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. *New Phytologist*, 131(3): 291-296.

- Pereira R. B., Pinheiro J. B. e Guimarães J. A. (2016) Manejo de Doenças Fúngicas no Sistema de Produção Integrada do Pimentão (PIP). Embrapa Hortaliças, Brasília, DF. *Embrapa Hortaliças. Circular técnica 147*.
- Pimenta, S., Rodrigues, R., Sudré, C. P., Moraes, J. G., Bento, C. S., Medeiros, A. M. (2016). Protecting vegetable cultivars in Brazil: a chili pepper case-study research. *Horticultura Brasileira*, 34(2): 161-167.
- Pinto, R.J.B. (2009). *Introdução ao melhoramento genético de plantas*. 2ª Edição. Maringá, Editora da UEM, 351p.
- Ramaroson, M. L., Koutouan, C., Helesbeux, J. J., Le Clerc, V., Hamama, L., Geoffriau, E., & Briard, M. (2022). Role of phenylpropanoids and flavonoids in plant resistance to pests and diseases. *Molecules*, 27(23): 8371.
- Ramos, A., Taitano, N., Hale Inan, G. R., Strecker, J., Brewer, M., Gonzalo, M. J., & van der Knaap, E. (2018). *Tomato Analyzer user manual version 4*.
- Rêgo, E.R., Finger, F.L., Rêgo, M. (2011). *Produção, genética e melhoramento de pimentas (Capsicum spp.)*. Recife: Imprima, 223p.
- Reis A., Boiteux L. S. e Henz G. P. (2009). Antracnose em hortaliças da família Solanacea. *Embrapa Hortaliças. Circular técnica 79*.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Spec. Publ*, 351(1), 309.
- Sahitya, U. L., Deepthi, S., Kasim, P., Suneetha, P., Krishna, M. S. R. (2014). Anthracnose, a prevalent disease in *Capsicum*. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 5(3): 1583-1604.
- Saja, D., Janeczko, A., Barna, B., Skoczowski, A., Dziurka, M., Kornaś, A., & Gullner, G. (2020). Powdery mildew-induced hormonal and photosynthetic changes in barley near isogenic lines carrying various resistant genes. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(12): 4536.

- Saxena, Amrita, Raghuwanshi, R., Gupta, V. K., & Singh, H. B. (2016). Chili anthracnose: The epidemiology and management. *Frontiers in Microbiology*, 7(SEP), 1–18.
- Schlösser, E. (1993, September). *Preformed phenols as resistance factors. In International Symposium on Natural Phenols in Plant Resistance 381* (pp. 615-630).
- Scott, A. J., & Knott, M. (1974). A cluster analysis method for grouping means in the analysis of variance. *Biometrics*, 507-512.
- Sharifi, A. (2020). Remotely sensed vegetation indices for crop nutrition mapping. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(14): 5191-5196.
- Silva, L. R. A., Rodrigues, R., Pimenta, S., Correa, J. W. S., Araújo, M. S. B., Bento, C. S., & Sudré, C. P. (2017). Inheritance of bacterial spot resistance in *Capsicum annuum* var. *annuum*. *Genet. Mol. Res*, 16, 1-11.
- Silva, S. A. M., Rodrigues, R., Gonçalves, L. S. A., Sudré, C. P., Bento, C. S., Carmo, M. G. F., & Medeiros, A. M. (2014). Resistance in *Capsicum* spp. to anthracnose affected by different stages of fruit development during pre- and post-harvest. *Tropical Plant Pathology*, 39(4): 335–341.
- Silvar, C., García-González, C.A. (2017) Screening old peppers (*Capsicum* spp.) for disease resistance and pungency-related traits. *Sci. Hortic.* 218, 249–257.
- Souza, C. S., Paulsen, B. S., Devalle, S., Lima Costa, S., Borges, H. L., & Rehen, S. K. (2015). Commitment of human pluripotent stem cells to a neural lineage is induced by the pro-estrogenic flavonoid apigenin. *Advances in Regenerative Biology*, 2(1): 29244.
- Stommel, J. R., & Bosland, P. W. (2006). Pepper, ornamental, *Capsicum annuum*. Flower breeding and genetics: Issues, challenges and opportunities for the 21st century. *Springer* (NO Anderson, Ed.) Dordrecht, The Netherlands, 561-599.
- Storck, L., & Ribeiro, N. D. (2011). Valores genéticos de linhas puras de soja preditos com o uso do método de Papadakis. *Bragantia*, 70, 753-758.

- Sun, C., Mao, S. L., Zhang, Z. H., Palloix, A., Wang, L. H., Zhang, B. X. (2015). Resistances to anthracnose (*Colletotrichum acutatum*) of *Capsicum* mature green and ripe fruit are controlled by a major dominant cluster of QTLs on chromosome P5. *Scientia Horticulturae*, 181: 81-88.
- Tanksley S.D. (1984) High rates of cross-pollination in chile pepper, *HortScience*, 19: 580-582.
- Tartachnyk, I. I., Rademacher, I., & Ku"nhauch, W. (2006). Distinguishing nitrogen deficiency and fungal infection of winter wheat by laser-induced fluorescence. *Precision Agriculture*, 7(4): 281–293.
- Than, P. P., Prihastuti, H., Phoulivong, S., Taylor, P. W. J., e Hyde, K. D. (2008). Chilli anthracnose disease caused by *Colletotrichum* species. *Journal of Zhejiang University Science B*, 9(10): 764–778.
- Thuphairo, K., Sornchan, P., & Suttisansanee, U. (2019). Bioactive compounds, antioxidant activity and inhibition of key enzymes relevant to Alzheimer's disease from sweet pepper (*Capsicum annuum*) extracts. *Preventive nutrition and food science*, 24(3), 327.
- Töfoli J. G., Domingues R. J. e Ferrari J. T. (2015) Antracnose em solanáceas: etiologia, características e controle. *Biológico*, 77: 73-79.
- Tong N, Bosland, P. W. (2003). Observations on interspecific compatibility and meiotic chromosome behavior of *Capsicum buforum* and *C. lanceolatum*. *Genetic Resources and Crop Evolution*. 50: 193-199.
- Treutter, D. (2006). Significance of flavonoids in plant resistance: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 4(3): 147-157.
- Wang, D., e Bosland, P. W. (2006). The genes of *Capsicum*. *HortScience*, 41(5), 1169–1187.
- Wang, R., Wang, G. L., & Ning, Y. (2019). PALs: emerging key players in broad-spectrum disease resistance. *Trends in plant science*, 24(9): 785-787.
- Wickham, "ggplot2_ Elegant Graphics for Data Analysis _ SpringerLink,". (2016). *Springer-Verlag*, New York.

- Yang, J., Luo, B., Xu, G., Li, T., Chen, Y., Zhang, T. (2013). Low-concentration capsaicin promotes colorectal cancer metastasis by triggering ROS production and modulating Akt/mTOR and STAT-3 pathways, *Neoplasma*, 60: 364–372.
- Yang, W., Feng, H., Zhang, X., Zhang, J., Doonan, J. H., Batchelor, W. D., & Yan, J. (2020). Crop phenomics and high-throughput phenotyping: past decades, current challenges, and future perspectives. *Molecular Plant*, 13(2): 187-214.
- Zhao, D., Raja Reddy, K., Kakani, V. G., Read, J. J., & Carter, G. A. (2003). Corn (*Zea mays* L.) growth, leaf pigment concentration, photosynthesis and leaf hyperspectral reflectance properties as affected by nitrogen supply. *Plant and soil*, 257, 205-218.
- Zhao, Y., Liu, Y., Zhang, Z., Cao, Y., Yu, H., Ma, W., Wang, L. (2020). Fine mapping of the major anthracnose resistance QTL *AnRGO5* in *Capsicum chinense* "PBC932." *BMC Plant Biology*, 20(1), 1–8.
- Zimmer, A. R., Leonardi, B., Miron, D., Schapoval, E., Oliveira, J. R., Gosmann, G. (2012). Antioxidant and anti-inflammatory properties of *Capsicum baccatum*: from traditional use to scientific approach. *Journal of Ethnopharmacology*, 139: 228- 2.