

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Nairiane dos Santos Bilhalva

**MONITORAMENTO DE FATORES BIÓTICOS E ABIÓTICOS PARA
CONTROLE DA QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO
ARMAZENADOS EM SILOS VERTICAIS**

Santa Maria, RS
2022

Nairiane dos Santos Bilhalva

**MONITORAMENTO DE FATORES BIÓTICOS E ABIÓTICOS PARA CONTROLE
DA QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO ARMAZENADOS EM SILOS VERTICAIS**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de Mestra em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi

Santa Maria, RS
2022

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001

BILHALVA, NAIRIANE
MONITORAMENTO DE FATORES BIÓTICOS E ABIÓTICOS PARA
CONTROLE DA QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO ARMAZENADOS EM
SILOS VERTICAIS / NAIRIANE BILHALVA.- 2022.
97 p.; 30 cm

Orientador: Paulo Carteri Coradi
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Campus de Cachoeira de Sul, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2022

1. Dióxido de carbono 2. Sensores 3. Temperatura da
massa de grãos 4. Umidade de equilíbrio higroscópico 5.
Zea mays L. I. Carteri Coradi, Paulo II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

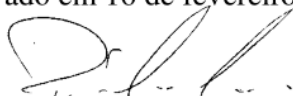
Declaro, NAIRIANE BILHALVA, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Nairiane dos Santos Bilhalva

MONITORAMENTO DE FATORES BIÓTICOS E ABIÓTICOS PARA CONTROLE DA QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO ARMAZENADOS EM SILOS VERTICAIS

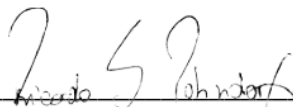
Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestra em Engenharia Agrícola**.

Aprovado em 16 de fevereiro de 2022.



Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi
UFSM Campus Cachoeira do Sul
STAPE 1695482

Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi (UFSM-CS)
(Presidente/Orientador - Videoconferência)



Prof. Dr. Ricardo Scherer Pohndorf (UFPEL)
(Membro Externo – Videoconferência)



Prof. Dr.ª Bárbara Biduski (UPF)
(Membro Externo - Videoconferência)

Aos meus pais, Elbio e Tatiane, dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me guiar e proteger, pelas oportunidades colocadas em meu caminho e pela força necessária para aproveitá-las e principalmente pela saúde da minha família e pelo privilégio de poder compartilhar mais uma conquista com eles.

Aos meus pais, Elbio Bilhalva de Bilhalva e Tatiane dos Santos Bilhalva, pelo apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida, por acreditarem em mim e não medirem esforços pela concretização dos meus sonhos. Sem vocês nada seria possível!

As minhas irmãs, Nairele dos Santos Bilhalva e Anita dos Santos Bilhalva, pela certeza de nunca estar sozinha. E a Anita, em particular, pela disponibilidade de realizar a coleta dos dados sempre que precisei.

A toda a minha família, em especial ao meu afilhado, Rafael dos Santos Grande, que mesmo de longe é meu motivo número 1 para nunca desistir e buscar sempre ser uma pessoa melhor.

Ao meu namorado, Douglas da Fontoura Tassis, por estar comigo desde o início dessa caminhada e deixar tudo mais divertido, obrigada por ser meu ponto de paz em meio ao caos.

As amigas Camila Fontoura Nunes e Ítala Thaísa Padilha Dubal, pela amizade, desabafos e pela ajuda com as análises físicas.

Ao meu orientador, Paulo Carteri Coradi, pela oportunidade, orientação, incentivo e suporte durante a realização deste trabalho.

A Universidade Federal de Santa Maria, em especial o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e ao Laboratório de Pós-Colheita (LAPOS) pelo ensino de qualidade.

A Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – CAPES pela bolsa de estudos concedida.

A Universidade de Passo Fundo, a Dr^a. Bárbara Biduski e ao técnico de laboratório, João Carlos Barcelos Farezin, pela disponibilidade e auxílio na realização das análises físico-químicas.

Ao Instituto Federal Farroupilha - Campus Alegrete e ao técnico de laboratório e amigo Elton Pilar Medeiros pela disponibilidade, auxílio na moagem dos grãos e pelas palavras de incentivo.

Aos colegas Éverton Lutz e Henrique Eguilhor pelo auxílio no experimento.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigada!

*“O que vale na vida não é o ponto de partida
e sim a caminhada. Caminhando e semeando,
no fim terás o que colher.”*

Cora Coralina

RESUMO

MONITORAMENTO DE FATORES BIÓTICOS E ABIÓTICOS PARA CONTROLE DA QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO ARMazenADOS EM SILOS VERTICAIS

AUTORA Nairiane dos Santos Bilhalva
ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi

A massa de grãos no ambiente de armazenamento constitui um ecossistema dinâmico, formado por elementos bióticos e abióticos que são afetados tanto química como biologicamente por diversos fatores. A temperatura, umidade relativa do ar e concentração de dióxido de carbono (CO₂) devem ser monitorados, uma vez que variações anormais em qualquer um desses fatores pode criar condições favoráveis para a deterioração dos grãos. Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi monitorar os fatores bióticos e abióticos que constituem o ecossistema de armazenamento, visando à detecção precoce da deterioração e controle da qualidade de grãos de milho armazenados em protótipos de silos verticais. O experimento foi realizado no município de Alegrete/RS a partir do armazenamento de grãos de milho com teores de água de 16, 14 e 12% em protótipos de silos verticais e monitoramento da temperatura do ar ambiente e intergranular, umidade relativa ambiente e intergranular e concentração de CO₂ na massa de grãos. As análises realizadas para controle da qualidade dos grãos foram: classificação dos grãos, massa específica aparente e real, porosidade intergranular, peso de mil grãos, condutividade elétrica, germinação, micotoxinas, composição centesimal, TG, FTIR, proteína solúvel, acidez lipídica, propriedades de pasta e MEV. Grãos armazenados com teor de água de 16 e 14% provocam maior aumento da temperatura intergranular, da concentração de CO₂ e da perda de matéria seca, bem como diminuição do tempo de armazenamento seguro, quando comparado aos grãos armazenados com 12%. As análises físicas e físico-químicas foram influenciadas pelo teor de água dos grãos e tempo de armazenamento. Conclui-se que houve redução da qualidade dos grãos de milho ao longo do armazenamento, grãos de milho armazenados com teor de água de 12% mantem a qualidade por mais tempo e o monitoramento de CO₂ se mostrou eficaz no controle da qualidade de grãos de milho durante o armazenamento, uma vez que otimiza a detecção da deterioração dos grãos.

Palavras-chave: Dióxido de carbono. Sensores. Temperatura da massa de grãos. Umidade de equilíbrio higroscópico. *Zea mays* L.

ABSTRACT

MONITORING OF BIOTIC AND ABIOTIC FACTORS FOR QUALITY OF CORN GRAINS STORED IN VERTICAL SILOS

AUTHOR: Nairiane dos Santos Bilhalva
ADVISOR: Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi

The grain mass in the storage environment constitutes a dynamic ecosystem, formed by biotic and abiotic elements that are affected both chemically and biologically by several factors. Temperature, relative air humidity and carbon dioxide (CO₂) concentration must be monitored, as abnormal variations in any of these factors can create favorable conditions for grain deterioration. Given the above, the objective of this work was to monitor the biotic and abiotic factors that constitute the storage ecosystem, aiming at the early detection of deterioration and quality control of corn grains stored in prototypes of vertical silos. The experiment was carried out in the city of Alegrete/RS from the storage of corn grains with water contents of 16, 14 and 12% in prototypes of vertical silos and monitoring of ambient and intergranular air temperature, ambient and intergranular relative humidity and CO₂ concentration in the grain mass. The analyzes carried out for grain quality control were: grain classification, apparent and real specific mass, intergranular porosity, thousand grain weight, electrical conductivity, germination, mycotoxins, centesimal composition, TG, FTIR, soluble protein, lipid acidity, of folder and SEM. Grains stored with water content of 16 and 14% cause a greater increase in intergranular temperature, CO₂ concentration and dry matter loss, as well as a decrease in safe storage time, when compared to grains stored with 12%. The physical and physicochemical analyzes were influenced by the water content of the grains and storage time. It is concluded that there was a reduction in the quality of corn grains during storage, corn grains stored with a water content of 12% maintain quality for longer and CO₂ monitoring proved to be effective in controlling the quality of corn grains during storage, as it optimizes the detection of grain deterioration.

Keywords: carbon dioxide, sensors, grain mass temperature, hygroscopic equilibrium moisture, *Zea mays* L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura dos grãos de milho.	20
Figura 2 - Estrutura dos grânulos de amido extraídos do endosperma farináceo (A) e endosperma vítreo (B) de grãos de milho.....	21
Figura 3 - Estrutura do β -caroteno, carotenoide com maior atividade pró-vitamínica.....	22
Figura 4 - Fluxograma operacional de uma Unidade Beneficiadora e Armazenadora de Grãos.	24
Figura 5 - Evolução da produção e da capacidade estática de armazenamento de grãos do Brasil, 2000-2019.....	26
Figura 6 - Pressão de vapor e transferência de água entre produtos agrícolas e ar.	31
Figura 7 - <i>Sitophilus zeamais</i> A) adulto e B) adulto em tamanho real.....	34
Figura 8 - Mapa de localização do município de Alegrete/RS - Mapa confeccionado no software ArcGIS 10.6.1.....	40
Figura 9 - Protótipos de silos verticais utilizados para o armazenamento de grãos de milho. .	41
Figura 10 - Sensor modelo MZ-19 com infravermelho não dispersivo tipo NIR utilizado para a medição de dióxido de carbono (CO ₂).....	42
Figura 11 - A) Aberturas superiores do silo; B) Instalação do Sensor modelo MZ-19 na parte superior e interna do silo e do sensor do Termohigrômetro no centro da massa de grãos; C) Sensor do Termohigrômetro e D) Visão do Sensor modelo MZ-19 e sensor do Termohigrômetro.....	42
Figura 12 - Temperatura e umidade relativa do ar ambiente obtidas ao longo do período de armazenamento dos grãos de milho.....	51
Figura 13 - Temperatura e umidade relativa do ar ambiente e do ar intergranular ao longo dos 12 meses de armazenamento dos grãos de milho.	52
Figura 14 - Concentração de CO ₂ na massa de grãos em função da temperatura do ar ao longo do armazenamento de grãos de milho.	53
Figura 15 - Concentração de CO ₂ na massa de grãos em função da umidade relativa do ar ao longo do armazenamento de grãos de milho.	54
Figura 16 - Umidade de equilíbrio higroscópico em função da: A) Temperatura do ar e B) Umidade relativa do ar ao longo do tempo de armazenamento dos grãos de milho.	54

Figura 17 - Perda de matéria seca ao longo do armazenamento em função: (A) Temperatura do ar e B) Umidade relativa do ar ao longo do tempo de armazenamento dos grãos de milho.....	55
Figura 18 - Concentração de CO ₂ na massa de grãos em função da perda de matéria seca ao longo do armazenamento.....	56
Figura 19 - Efeito do tempo de armazenamento e teor de água dos grãos na germinação (A), massa específica aparente (B), massa específica unitária (C), peso de mil grãos (D), condutividade elétrica (E) e porosidade intergranular (F).....	60
Figura 20 - Composição centesimal (%) dos grãos de milho armazenados por 12 meses com teor de água de 12, 14 e 16 % (b.u.)	65
Figura 21 - Acidez lipídica e proteína solúvel de milho armazenado com diferentes teores de água durante 12 meses.....	67
Figura 22 - Análise termogravimétrica (TG e DTG) de grãos de milho armazenados com diferentes teores de água.....	68
Figura 23 - Espectros de milho armazenado com teores de água de 16, 14 e 12% ao longo do armazenamento	70
Figura 24 - Curvas viscoamilográficas das amostras de milho armazenados com diferentes teores de água ao longo do armazenamento	72
Figura 25 - Parâmetros viscoamilográficos da amostra de milho armazenado por 12 meses com diferentes teores de água.....	73
Figura 26 - Micrografias obtidas através da microscopia eletrônica de varredura dos grãos de milho armazenados com diferentes teores de água.....	74
Figura 27 - Variáveis canônicas para variáveis físicas avaliadas no experimento.....	75
Figura 28 - Variáveis canônicas para variáveis físico-químicas avaliadas no experimento. ...	76
Figura 29 - Variáveis canônicas para outras variáveis avaliadas no experimento.	77
Figura 30 - Rede de correlação de Pearson entre as variáveis físicas, físico-químicas e outras variáveis avaliadas no experimento	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química das diferentes frações do grão de milho.....	20
Tabela 2 - Limites máximos de tolerância expressos em porcentual (%)......	29
Tabela 3 - Micotoxinas, fungos produtores e ocorrência em milho e em outros alimentos.	36
Tabela 4 - Delimitação dos tratamentos para entrada de dados no Software R.....	50
Tabela 5 - Cálculo da perda de matéria seca através da diferença de peso dos grãos de milho no enchimento (0 meses) e descarregamento (12 meses) dos protótipos de silos verticais.	57
Tabela 6 - Classificação de grãos de milho com diferentes teores de água ao longo do armazenamento.	58
Tabela 7 - Micotoxinas encontradas em grãos de milho armazenados com diferentes teores de água ao longo dos doze meses de armazenamento.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Amido
BOD	Biochemical Oxygen Demand
CAR	Grãos Carunchados
CE	Condutividade elétrica
CH	Grãos Chochos e Imaturos
CO ₂	Concentração de Dióxido de Carbono
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
CPA	Ácido Ciclopiazônico
CS	Cachoeira do Sul
CZ	Cinzas
DON	Tricotecenos DON
EE	Extrato Etéreo
ERG	Ergosterol
FB	Fibra Bruta
FB1	Fumonisin B1
FB2	Fumonisin B2
FER	Grãos Fermentados
G	Germinação
H ₂ O	Fórmula da água
HP	Horário de Pico
IR	Índice de Retrogradação
LAMIC	Laboratório de Análises Micotoxicológicas
LAPOS	Laboratório de Pós-Colheita
MEA	Massa Específica Aparente
MEI	Matérias Estranhas e Impurezas
MEU	Massa Específica Unitária
MOF	Grãos Mofados
O ₂	Oxigênio
P	Porosidade intergranular
P1000	Peso de mil grãos
PB	Proteína Bruta
P _{ms}	Perda de Matéria Seca

PPGEQ	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
PS	Proteína Solúvel
AL	Acidez Lipídica
PV	Pico de Viscosidade
Q	Quebra de Viscosidade
QUE	Grãos Quebrados
SAD	Grãos Sadios
T	Temperatura
TA	Teor de Água
TP	Temperatura de Pasta
UBG	Unidade Beneficiadora de Grãos
U _e	Umidade de Equilíbrio Higroscópico
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UPF	Universidade de Passo Fundo
UR	Umidade Relativa do ar
VF	Viscosidade Final
VMIN	Viscosidade Mínima
RVA	Unidade Viscoamilográfica
FTIR	Espectroscopia na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier
TG	Análise Termogravimétrica
DTG	Curva Diferencial Termogravimétrica
AFLA	Aflatoxinas
ANVISA	Agência Nacional De Vigilância Sanitária

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 HIPÓTESES	18
2 OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GERAL.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3 REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1 ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO DO GRÃO DE MILHO	20
3.2 OPERAÇÕES DE PÓS-COLHEITA.....	23
3.3 QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO ARMAZENADOS.....	28
3.3.1 Fatores que influenciam a qualidade dos grãos armazenados	29
3.4 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO ARMAZENADOS	36
3.4.1 Termometria	36
3.4.2 Respiração da massa de grãos	37
4 MATERIAL E MÉTODOS	40
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO.....	40
4.1.1 Perda de matéria seca	43
4.1.2 Umidade de equilíbrio higroscópico	43
4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	44
4.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS GRÃOS	44
4.3.1 Análises físicas	44
4.3.2 Análises físico-químicas	47
4.3.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	49
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	49
4.4.1 Análise de variância	49
4.4.2 Análise multivariada	50
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1 MONITORAMENTO DOS GRÃOS ARMAZENADOS	51
5.2 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS GRÃOS	57
5.2.1 Análises físicas	57
5.2.2 Análises físico-químicas	64
5.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	74

5.2.4 Análises multivariadas	75
6 CONCLUSÕES.....	79
REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) pertence à família Poaceae e é um dos grãos mais cultivados no mundo devido ao seu alto potencial produtivo, composição química e valor nutricional que possibilita ser utilizado tanto no consumo humano e alimentação animal, como na produção de biocombustível.

A cultura do milho se destaca pela importância no agronegócio nacional e internacional, caracterizando-se como o segundo grão mais exportado pelo Brasil, atualmente o terceiro país no ranking dos principais produtores mundiais, com produção de 109 milhões de toneladas, ficando atrás apenas da China e Estados Unidos, com produção de 260,67 e 360,25 milhões de toneladas, respectivamente.

O sucesso da produção de grãos, se dá, em grande parte, pela fase de pós-colheita, que tem como finalidade manter a qualidade dos produtos até a comercialização. No entanto, a capacidade estática de armazenamento, por sua vez, ainda é precária no Brasil e não suporta toda a produção. No ano de 2021, o déficit de armazenamento atingiu 110 milhões de toneladas de grãos, acarretando em perdas quanti e qualitativas aos produtores durante a colheita, no transporte e no valor do produto, uma vez que são obrigados a escoar a produção logo após a colheita ou armazenar seus produtos de forma incorreta.

O armazenamento de grãos de milho pode ser realizado em sacarias ou a granel. O armazenamento a granel em silos metálicos é predominantemente utilizado devido a economia de espaço físico, mão de obra reduzida, conservação do produto ensilado, menor custo de transporte, bem como, fácil controle de escoamento e abastecimento. A massa de grãos no ambiente de armazenamento constitui um ecossistema dinâmico, formado por elementos bióticos (grãos, insetos e microflora) e abióticos (impurezas, ar intergranular, vapor d'água e estrutura de armazenagem) que são afetados tanto química como biologicamente por diversos fatores, intrínsecos e extrínsecos à massa de grãos.

A temperatura, umidade relativa do ar e concentração de dióxido de carbono (CO₂) devem ser monitorados, uma vez que variações anormais em qualquer um desses fatores pode criar condições favoráveis para a deterioração dos grãos. Os sistemas de monitoramento da massa de grãos limitam-se a medição da temperatura da massa de grãos (sistema de termometria) e da inspeção manual e visual. Os sensores utilizados na termometria detectam a variação da temperatura em pontos equidistantes, logo, o avanço da deterioração muitas vezes já é significativo quando detectado. Tratando-se da inspeção manual e visual, esta pode ser tendenciosa e varia de operador para operador.

O monitoramento adequado da qualidade dos grãos armazenados e a consequente detecção precoce da deterioração pode auxiliar a reduzir perdas e diminuir os índices de contaminações dos grãos. Portanto, métodos tecnológicos de monitoramento, que permitam a detecção da deterioração no início da atividade biológica poderiam ser desenvolvidos e incorporados nos protocolos de gerenciamento de grãos armazenados.

Os grãos por serem organismos vivos respiram e quando influenciados por fatores abióticos aceleram sua atividade metabólica aumentando a o processo respiratório e a produção de CO₂, logo, alterações nesta concentração podem ser detectadas com sensibilidade em cada ponto de amostragem. Diante do exposto, já foram desenvolvidos sensores capazes de mensurar a concentração de CO₂ da massa de grãos, além de medirem a temperatura e umidade relativa do ar, no entanto, ainda são necessários modelos capazes de prever a deterioração de grãos, o que ajudaria na tomada de decisões em relação ao tempo de armazenamento, preservando a qualidade dos grãos e reduzindo as perdas.

Portanto, mais estudos com a utilização de sensores de CO₂ são necessários para fornecer informações a respeito da aplicabilidade desta ferramenta no monitoramento de grãos armazenados, especialmente em silos metálicos, visando a eficiência do sistema.

1.1 HIPÓTESES

- O aumento do tempo de armazenamento atrelado à elevados teores de água provocarão redução da qualidade dos grãos de milho;
- Com a variação da temperatura, umidade relativa do ar e teores de água nos grãos haverá alterações na concentração de CO₂ e correlações com a qualidade dos grãos de milho;
- As variações da temperatura, umidade relativa do ar e teores de água alterarão a umidade de equilíbrio higroscópico e a perda de massa dos grãos, podendo ser utilizados como indicativo da alteração da qualidade dos grãos de milho.
- A utilização de sensores de CO₂ será útil no monitoramento da qualidade dos grãos e poderá ser utilizada na detecção precoce da deterioração dos grãos;

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Monitorar os fatores bióticos e abióticos que constituem o ecossistema de armazenamento, visando à detecção precoce da deterioração e controle da qualidade de grãos de milho armazenados em protótipos de silos verticais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

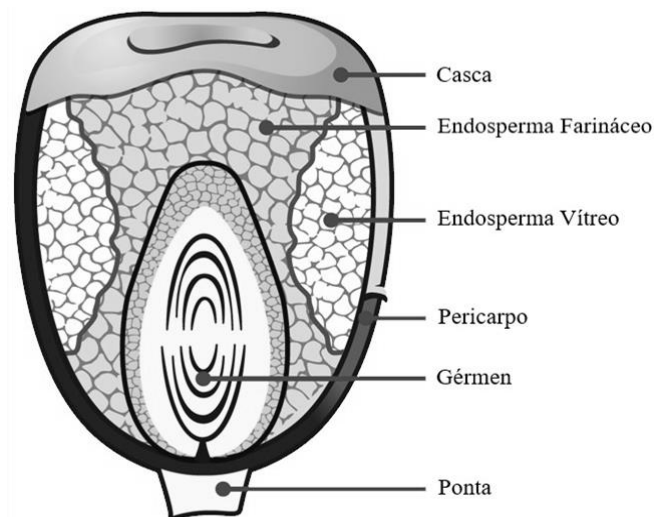
- Avaliar a qualidade dos grãos de milho ao longo do armazenamento, verificando a influência do teor de água dos grãos no tempo de armazenamento seguro;
- Determinar a umidade de equilíbrio higroscópico e a perda de massa dos grãos de milho como parâmetros quanti-qualitativo para o monitoramento da qualidade ao longo do armazenamento;
- Comparar a utilização de sensores tradicionais (temperatura e umidade relativa do ar) com os de CO₂ no monitoramento de fatores que influenciam a qualidade dos grãos de milho.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ESTRUTURA E COMPOSIÇÃO DO GRÃO DE MILHO

O grão de milho é composto por endosperma, pericarpo, gérmen e ponta, envoltos pela casca, conforme apresentado na Figura 1, entretanto em função da grande diversidade existente entre as cultivares, pode apresentar variações nesta estrutura, apresentando diferentes composições de nutrientes e tamanhos nas estruturas, conforme apresentado na Tabela 1. As principais causas de variação na composição química dos grãos de milho são relacionadas às características do material genético, solo, adubação, condições climáticas e estágio de maturação da planta (GOMES et al., 2004; PAES, 2006).

Figura 1 - Estrutura dos grãos de milho.



FONTE: Adaptado de: <https://www.beefresearch.ca/research-topic.cfm/feed-grains-for-beef-cattle-105>

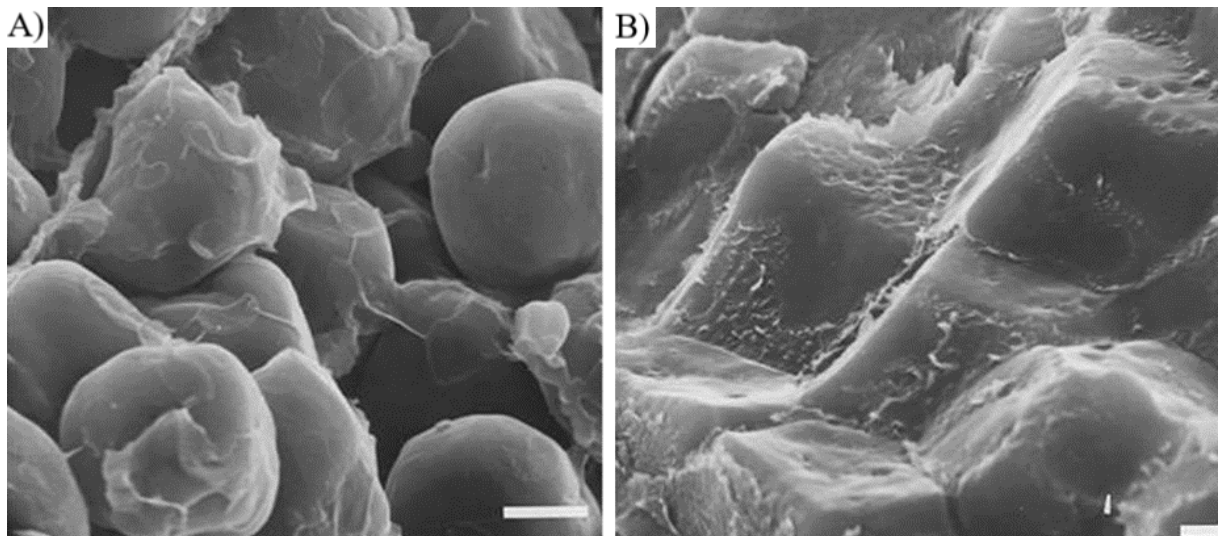
Tabela 1 - Composição química das diferentes frações do grão de milho.

Estrutura	% do grão	% da parte				
		Amido	Lipídios	Proteínas	Mineiras	Açúcares
Endosperma	82,00	86,60	0,86	8,60	0,31	0,61
Gérmen	11,00	8,30	34,40	18,50	10,30	11,00
Pericarpo	5,00	7,30	0,98	3,50	0,67	0,34
Ponta	2,00	5,30	3,80	9,70	1,70	1,50

FONTE: Adaptado de Bemiller e Whistler, 2009.

O endosperma possui aproximadamente 98% do total de amido, formado por grânulos com diâmetro médio de 20µm e forma variando desde poliédrica a esférica. Com base na distribuição dos grânulos de amido e da matriz proteica, o endosperma é classificado em dois tipos: farináceo e vítreo. No primeiro, os grânulos de amido são arredondados e estão dispersos, não havendo matriz proteica envolvendo essas estruturas, o que resulta em espaços vazios durante o processo de secagem do grão, a partir dos espaços onde antes era ocupado pela água, durante o desenvolvimento do grão. Por outro lado, no endosperma vítreo, a matriz proteica é densa, com corpos proteicos estruturados, que envolvem os grânulos de amido de formato poligonal, não permitindo espaços entre estas estruturas (DELCOUR; HOSENEY, 2010). A diferença da estrutura dos grânulos pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 - Estrutura dos grânulos de amido extraídos do endosperma farináceo (A) e endosperma vítreo (B) de grãos de milho.



FONTE: Delcour e Hosenev (2010).

As zeínas, proteínas de reserva do milho, possuem grande quantidade dos aminoácidos glutamina, leucina, alanina e prolina, estes quais conferem elevada hidrofobicidade ao resíduo extraído do endosperma no processo de produção do amido de milho (SHOTWEL; LARKINS, 1989), entretanto, são pobres em lisina e triptofano, essenciais à nutrição humana e de alguns monogástricos, caracterizando-se como proteína de baixa qualidade, pois corresponde a 65% da constituição presente no leite, considerada padrão para a nutrição humana.

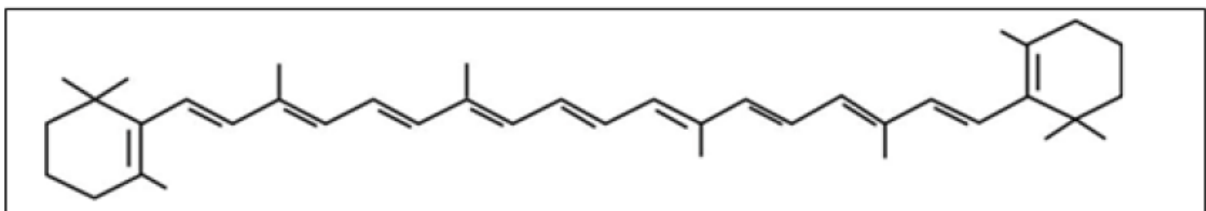
Nos países desenvolvidos, as zeínas são consideradas de grande importância industrial, pois são utilizadas como matéria-prima para a fabricação de filmes comestíveis destinados ao revestimento de frutas, verduras e grãos, visando estender a vida de prateleira desses produtos.

Além desse uso, as proteínas de reserva são utilizadas na fabricação de fibras para diversas aplicações, como encapsulamento de sementes e fabricação de embalagens biodegradáveis (LAWTON, 2002).

As proteínas do endosperma do milho, que caracterizam a matriz proteica, podem ser classificadas de acordo com a solubilidade em quatro frações: albuminas, globulinas, prolaminas e glutelinas, que constituem respectivamente 3%, 3%, 60% e 34% do total de proteínas do endosperma. Estudos constatam que o conteúdo de proteína, em especial de zeínas, está associado com diferenças na dureza dos grãos de cereais (CHANDRASHEKAR; MAZHAR, 1999).

No endosperma, especificamente, na camada de aleurona e no endosperma vítreo, estão presentes os compostos fenólicos e os carotenoides, substâncias lipossolúveis que conferem a cor aos grãos de milho, sendo zeaxantina, luteína, betacriptoxantina, alfa e beta carotenos, os principais carotenoides nos grãos de milho (PAES, 2006). O β -caroteno (Figura 3) é o carotenoide que apresenta maior atividade pró-vitáminica, além de α -caroteno, betacriptoxantina e zeinoxantina também possuem atividade pró-vitáminica (RODRIGUEZ-AMAYA, 2001), sendo que o β -caroteno apresenta duas vezes a atividade do α -caroteno e β -criptoxantina por apresentar dois anéis β não substituíveis.

Figura 3 - Estrutura do β -caroteno, carotenoide com maior atividade pró-vitáminica.



FONTE: Rodriguez-Amaya (2001).

O grão de milho, apesar de possuir baixa concentração de β -caroteno (motivo alvo de processos de melhoramento), apresentam altas concentrações de luteína e zeaxantina, caracterizando-se como espécie carotenogênica, ou seja, fonte de carotenoides. Nos grãos de milho, os carotenoides estão uniformemente distribuídos, com quantidades significativas na camada de aleurona e no endosperma (KONOPKA et al., 2004).

O gérmen representa 11% do grão de milho, concentrando aproximadamente 83% de lipídios (óleo e vitamina E), 78% de minerais, bem como quantidades importantes de proteínas (26%) e açúcares (70%). No gérmen, estão presentes as proteínas do tipo albuminas, globulinas

e glutelinas, que diferem significativamente, em composição e organização molecular, daquelas encontradas no endosperma e, conseqüentemente, diferindo das primeiras em qualidade nutricional e propriedades tecnológicas (PATERNIANI e VIÉGAS, 1987).

A composição do óleo presente no gérmen do milho é distinta dos outros óleos vegetais quanto aos percentuais de ácidos graxos saturados, monoinsaturados e poli-insaturados, sendo aproximadamente 58% de poliinsaturados, 29% de monoinsaturados e 13% de saturados (PAES, 2006). Entretanto, o óleo de milho possui composição de ácidos graxos poliinsaturados semelhante aos óleos de soja e girassol. Nesses óleos vegetais, o principal componente é o ácido graxo linoleico (ômega 6), contendo um pequeno percentual do ácido graxo linolênico (ômega 3), que são considerados essenciais à nutrição humana e de alguns animais, dada a incapacidade de síntese dos mesmos pelo organismo.

De acordo com Paes (2006), o pericarpo representa em média 5% do grão, é a estrutura que protege as demais estruturas do grão da elevada umidade do ambiente, insetos e micro-organismos. As camadas de células que compõem essa fração são constituídas de polissacarídeos do tipo hemicelulose (67%) e celulose (23%), embora também contenha lignina (0,1%). A ponta é a menor estrutura do grão (2%), sendo responsável pela conexão do grão ao sabugo na espiga, única área do grão não coberta pelo pericarpo, e que possui sua composição essencialmente de material lignocelulósico.

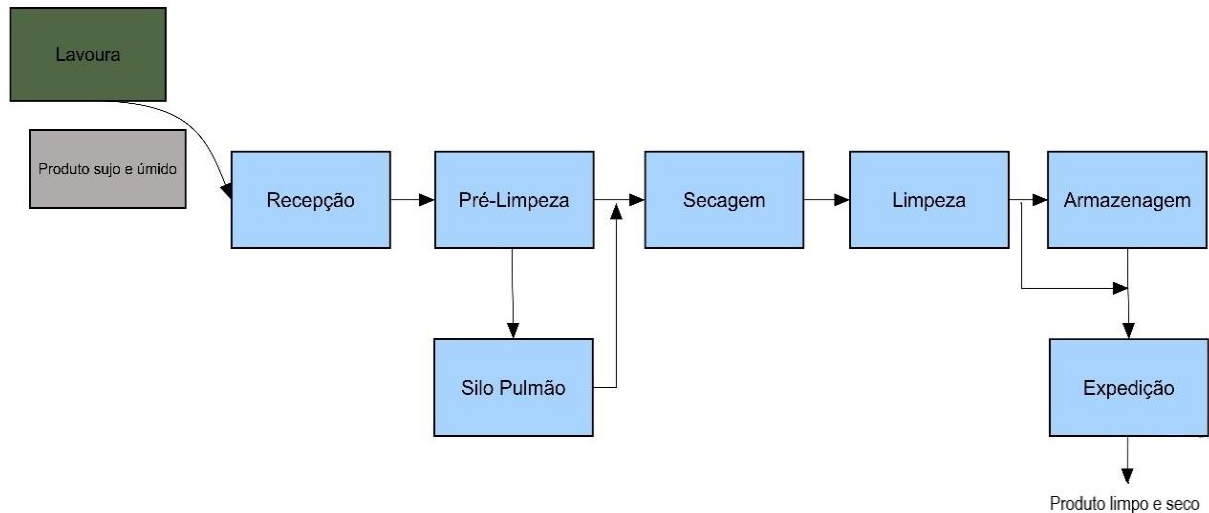
3.2 OPERAÇÕES DE PÓS-COLHEITA

O sucesso da produção de grãos se dá, em grande parte, pela pós-colheita adequada. O termo pós-colheita refere-se ao conjunto de técnicas aplicadas à conservação dos produtos vegetais (JUNIOR et al., 2016) durante as etapas de limpeza, secagem e beneficiamento, visando evitar alterações físico-químicas indesejáveis (redução dos teores de proteína, teores de lipídios e aumento da acidez graxa, além de evitar danos físicos causados pelo ataque de insetos, proliferação de fungos e perda de matéria seca), a fim de proporcionar um armazenamento seguro e manter a qualidade dos produtos até a comercialização.

O pré-processamento de grãos caracteriza-se pelas operações de recepção, limpeza, secagem, armazenagem e movimentação, e tem como objetivo garantir o abastecimento normal dos produtos durante a entressafra, além de diminuir suas perdas, tanto em qualidade como em quantidade. As instalações onde se realizam as operações de pré-processamento e armazenagem de grãos, são denominadas de Unidades Beneficiadoras de Grãos (UBG). Para garantir um fluxo adequado (Figura 4), a UBG deve ser planejada com estruturas físicas e equipamentos, como

moegas, silos pulmões, silos armazenadores, máquinas de pré-limpeza, máquina de limpeza, elevadores verticais e secadores, dispostos interligados entre si (WEBER, 2005).

Figura 4 - Fluxograma operacional de uma Unidade Beneficiadora e Armazenadora de Grãos.



FONTE: Autora.

A recepção dos grãos na unidade de armazenamento é fundamental para que seja realizada uma caracterização inicial. Ao chegar na UBG, a carga de grãos é submetida às operações de amostragem, pesagem e análises laboratoriais no setor de recepção, lugar que compreende as instalações de escritório, laboratório e balança rodoviária. Para a pesagem das cargas de grãos, utiliza-se um sistema de balança rodoviária onde são registradas informações como: tara do veículo, peso total, peso líquido, identificação do veículo, nome do proprietário da carga, produto transportado, horário de entrada e saída do veículo (TEIXEIRA, 2006).

A amostragem de grãos é a prática que consiste em obter uma porção representativa de um lote de grãos, a fim de conhecer a sua qualidade. A finalidade da amostragem é obter uma amostra de tamanho adequado para os testes, na qual estejam presentes os mesmos componentes do lote a ser classificado e em proporções semelhantes. De acordo com os critérios estatísticos simples, as amostras são coletadas ao acaso, com auxílio de caladores mecânicos manuais ou pneumáticos. O número de calagens, por sua vez, é definido conforme o tamanho do veículo de carga (caminhão, carreta, entre outros) (CONAB, 2015).

A partir das análises laboratoriais (teor de água, impurezas e matérias estranhas, defeitos e determinação do grupo) dessas amostras, realizadas baseando-se no padrão estabelecido via Instrução Normativa nº 60, de 23/12/2011, que estabelece as especificações para a padronização, classificação e comercialização do milho, serão procedidas inferências sobre o

estado da carga por completo. Desse modo, se a carga é indevidamente amostrada, os valores inferidos podem, por exemplo, subestimar os valores dos teores de impureza e de água (BRASIL, 2011).

Posteriormente, os grãos são submetidos a uma etapa de pré-limpeza, para remoção parcial das matérias estranhas e impurezas na massa de grãos. Grãos colhidos com máquinas ou trilhadoras mecânicas apresentam elevada quantidade de matérias estranhas (grãos ou sementes de outras espécies, detritos vegetais, insetos mortos e corpos estranhos de qualquer natureza não oriundos da espécie considerada) e impurezas (pedaços de ramos, folhas, palhas e qualquer material oriundo da cultura do milho) (BOTELHO et al., 2019).

O teor de água adequado para o armazenamento depende da espécie e do período que se pretende armazenar os grãos, sendo que além do teor de água, fatores como temperatura, umidade relativa do ar, pragas e doenças podem interferir na qualidade. Se o milho for colhido com teor de água elevado (25-30%), é necessário ser submetido a uma etapa de secagem, que é conduzida até que os grãos atinjam teores seguros (12-13%) a fim de conservar as características físico-químicas e tecnológicas iniciais (BERN; QUICK; HERUM, 2019; TIMM, 2020).

Para o armazenamento de milho, recomenda-se que os teores sejam inferiores a 13% para armazenamento de até um ano e entre 12 e 11% para períodos superiores, sendo, portanto, indispensável a secagem no processo de armazenamento de grãos de milho. A secagem de grãos pode ser feita de diversas maneiras, sendo elas com movimentação dos grãos em sistemas contínuos e intermitentes, com fluxos de produtos e ar de secagem contracorrentes, concorrentes, cruzados, mistos, em sistemas de leitos fluidizados e camadas fixas. Para controle dos sistemas de secagem são monitoradas a temperatura do ar de secagem, a vazão de ar de secagem, o tempo de residência do produto no secador e os teores de água inicial e final do produto. A circulação de ar no secador é feita por sucção e aspiração, utilizando ventiladores e exaustores (OLIVEIRA, 2018).

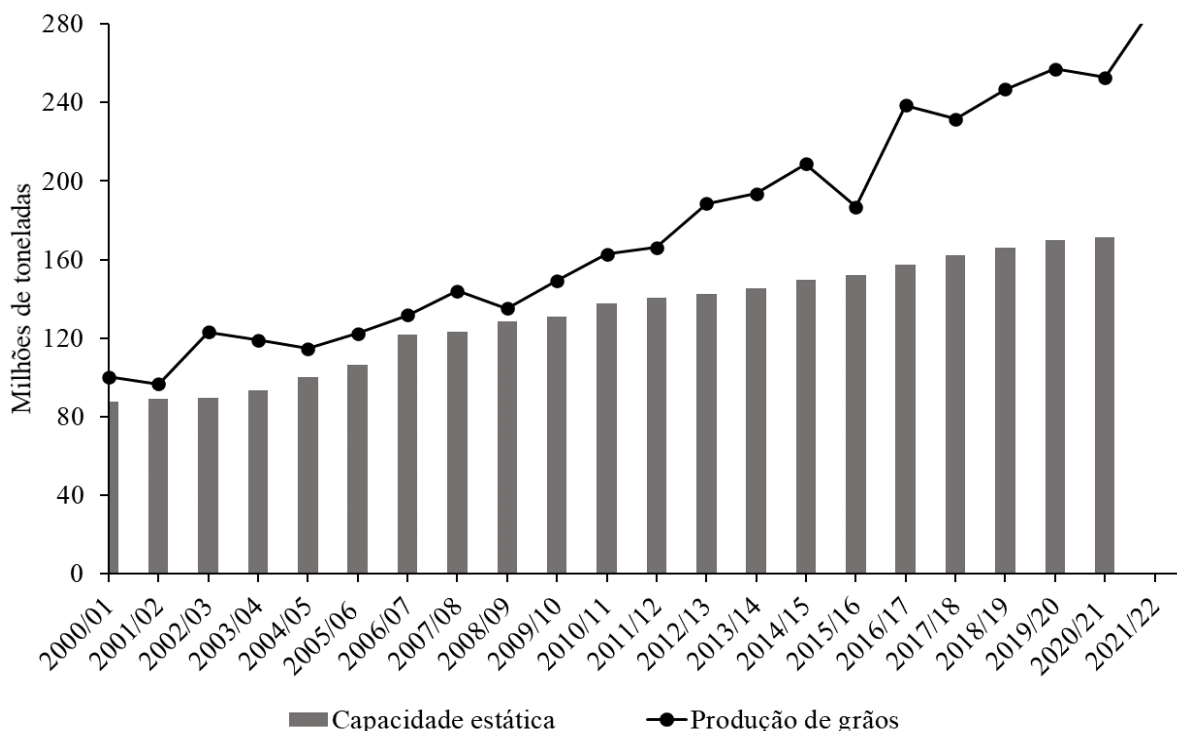
Após a secagem, caso necessário, os grãos de milho são submetidos a uma segunda etapa de limpeza, com objetivo de remover impurezas que ainda permaneceram junto aos grãos, estas quais podem ser remanescentes da pré-limpeza ou as produzidas pelo sistema de secagem. Esta operação caracteriza-se pela separação rigorosa de todos os materiais indesejáveis, como sementes ou grãos de outras espécies (cultivadas ou silvestres), sementes defeituosas e imaturas, sementes ou grãos quebrados, entre outros. Na operação de limpeza, usa-se, normalmente, uma máquina de ventilador e peneira, que, dependendo do rigor da separação, pode possuir várias peneiras e mais de um ventilador. A operação de limpeza deve reduzir os teores de matéria

estranha e impureza para valores inferiores a 1%, a fim de garantir um armazenamento seguro (ZIEGLER et al., 2021).

O armazenamento, por ser uma das etapas de maior importância na pós-colheita, está presente em todo o circuito espacial dos produtos alimentares, tanto nos locais de produção, transporte in natura dos grãos, locais de industrialização, como nos estoques formados pelos atacadistas e varejistas, sem contar os grãos exportados e importados, demonstrando um papel de suma importância para a logística do agronegócio.

Apesar da produção de grãos crescer a cada ano, a evolução de todos os elos da cadeia agroindustrial não ocorre no mesmo ritmo, visto que a capacidade estática de armazenamento não evolui significativamente (POZZE, 2020). O Brasil vem enfrentando sérios problemas nesse setor, uma vez que a produção de grãos no país é maior do que a capacidade estática de armazenamento (Figura 5).

Figura 5 - Evolução da produção e da capacidade estática de armazenamento de grãos do Brasil, 2000-2019.



FONTE: Autora. Gráfico elaborado com dados da CONAB (2019) e CONAB (2021).

A falta de unidades de armazenamento a nível agrícola aumentou os problemas, forçando os produtores a comercializar seus produtos a preços baixos de mercado, imediatamente após a colheita (CHEN et al., 2010; BOKUSHEVA et al., 2012; CORADI; LEMES, 2018).

De acordo com as recomendações da FAO, a capacidade de estática de armazenamento deve ser pelo menos 1,2 vezes maior que a produção anual. No entanto, a capacidade de armazenamento brasileira é de 180,6 milhões de toneladas, com um déficit de aproximadamente 110 milhões de toneladas em relação à produção (CONAB, 2021). As unidades responsáveis pelo recebimento da matéria-prima têm papel importante no agronegócio, especialmente no que se refere às políticas de escoamento e abastecimento de grãos, como importação e exportação de grãos.

O armazenamento de grãos de milho pode ocorrer em sacarias (armazenamento convencional) ou em estruturas que permitam o armazenamento a granel (AZEVEDO et al., 2008). No armazenamento convencional, os grãos de milho são estocados limpos e secos em sacos de 60 kg cada, tendo como vantagens o baixo custo de instalação, facilidade para segregar a produção e não precisar de técnicas aprimoradas no manuseio e conservação. Entretanto, este método de armazenamento apresenta limitações como o elevado preço da sacaria, impossibilidade de movimentar de forma automatizada os grãos e requerer um espaço maior para armazenamento. Tais limitações tornam o armazenamento em sacaria pouco utilizado, sendo destinado apenas para pequenos volumes de grãos.

O armazenamento a granel é predominantemente utilizado (ZIEGLER et al., 2021). Nesse caso os grãos são estocados em silos metálicos (estruturas verticais) e/ou em armazéns de alvenaria (estruturas horizontais). Os silos, bastante utilizados no armazenamento de grãos a granel na Fronteira Oeste, são estruturas individualizadas, construídas de chapas metálicas, concreto ou alvenaria e geralmente possuem forma cilíndrica.

O armazenamento de produtos em silos é considerado viável devido a diversos fatores como: economia de espaço físico, mão de obra reduzida, conservação do produto ensilado, menor custo de transporte, bem como fácil controle de escoamento e abastecimento. Essas estruturas devem ser equipadas com sensores de termometria e/ou de detecção de dióxido de carbono (CO₂), que auxiliam no monitoramento e conservação dos grãos durante o armazenamento (ILELEJI et al., 2006; UBHI; SADAKA, 2015; ANTUNES et al., 2016; CORADI et al., 2016b).

O sistema de expedição consiste em um depósito elevado abaixo do qual é estacionado para carregamento caminhões ou vagões ferroviários. O depósito pode ser construído em concreto, chapas metálicas, ou ainda ser empregado silos metálicos. Todas essas estruturas devem possuir fundo inclinado para propiciar a descarga por gravidade com fluxo de aproximadamente 360 toneladas de produto por hora (SILVA, 2009).

3.3 QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO ARMAZENADOS

A qualidade dos grãos é comumente definida em função da sua utilização. Dessa forma, no mercado externo, as indústrias definem o tipo de matéria-prima que desejam. Em uma indústria de amido, por exemplo, o fator de qualidade é indicado através das características dos grãos que apresentem maiores teores de amido no endosperma. Já indústrias que trabalham com extração de óleo comestível preferem grãos com altos teores de óleo no germe. Portanto, a qualidade do grão para um determinado uso industrial, pode não ter as mesmas características para outra indústria (ASCHERI; GERMANI, 2004).

A qualidade de armazenamento depende da qualidade inicial dos grãos, uma vez que no ambiente de armazenamento, a massa de grãos constitui um ecossistema dinâmico, formado por elementos bióticos (grãos, insetos e microflora) e abióticos (impurezas, ar intergranular, vapor d'água e estrutura de armazenagem) que são afetados, tanto química como biologicamente por diversos fatores, intrínsecos e extrínsecos à massa de grãos (BROOKER et al., 1992; RAUDIENE et al., 2017), como temperatura, teor de água nos grãos, umidade relativa, atmosfera de armazenamento, conteúdo de grãos quebrados, conteúdo de impureza, presença de microrganismos, insetos, ácaros e tempo de armazenamento, estes quais podem reduzir a qualidade do grão (REED et al., 2007; REHMAN et al., 2002; PARAGINSKI et al., 2014a; PARAGINSKI et al., 2014b; PARAGINSKI et al., 2015; CORADI et al., 2016a; LANE; WOLOSHUK, 2017; PARAGINSKI, 2019).

A qualidade física e o valor comercial dos grãos de milho estão diretamente relacionadas à integridade do grão em relação à presença de defeitos (trincas, fissuras, grãos quebrados e impurezas), geralmente produzidas por dano mecânico (durante a colheita e a movimentação do grão), ou por dano térmico (altas temperaturas) no processo de secagem. Os grãos quebrados e trincados que possuam qualidade nutricional satisfatória, por sua vez, são processados e beneficiados, para obtenção de alimentos derivados de milho, ou ainda, destinados à ração animal.

No Brasil, os critérios para classificação comercial dos grãos de milho são estabelecidos pela instrução normativa nº60 instituída pelo Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2011). Nela o milho é classificado em três tipos, onde é levado em consideração, principalmente, o índice de grãos avariados (ardidos, chochos, imaturos, fermentados, germinados, gessados ou mofados), quebrados, com matérias estranhas ou impurezas e carunchados (Tabela 2).

Tabela 2 - Limites máximos de tolerância expressos em percentual (%).

Enquadramento	Grãos avariados		Grãos quebrados	Matérias estranhas e impurezas	Carunchados
	Ardidos	Total			
Tipo 1	1,00	6,00	3,00	1,00	2,00
Tipo 2	2,00	10,00	4,00	1,50	3,00
Tipo 3	3,00	15,00	5,00	2,00	4,00
Fora de Tipo	5,00	20,00	Maior que 5,00	Maior que 2,00	8,00

FONTE: (BRASIL, 2011)

A classificação comercial dos grãos milho, de maneira geral, determina sua qualidade física, a qual é relacionada com a integridade do material e com sua pureza. Contudo, com o intuito de obter uma melhor caracterização do material, é possível determinar parâmetros adicionais (SILVA et al, 2015b).

3.3.1 Fatores que influenciam a qualidade dos grãos armazenados

3.3.1.1 Temperatura da massa de grãos

A temperatura é um dos principais fatores que interferem a qualidade dos grãos durante o armazenamento (REHMAN et al., 2002; REED et al., 2007; PARK et al., 2012), uma vez que todos os fatores que ameaçam a perda de qualidade dos grãos, causam seu aumento. Assim, o monitoramento constante da temperatura dos grãos pode impedir um processo de deterioração. Além disso, a temperatura dos grãos armazenados é um bom índice do seu estado de conservação, sendo que toda variação brusca de temperatura deve ser encarada com bastante cautela e sua causa pesquisada o quanto antes, visando saná-la através da aeração ou transilagem (SCHIAVON et al., 2019).

A redução da temperatura dos grãos diminui a velocidade das reações bioquímicas e metabólicas dos grãos, pelas quais reservas armazenadas no tecido de sustentação são desdobradas, transportadas e ressintetizadas no eixo embrionário, permitindo a manutenção das características iniciais de armazenamento dos grãos por períodos mais longos (AGUIAR et al., 2012).

3.3.1.2 Teor de água nos grãos

O teor de água nos grãos é um dos fatores de maior influência no processo de deterioração dos grãos (RAUDIENE et al, 2017), tanto que, ao manter baixos os seus níveis, os demais terão seus efeitos gradualmente diminuídos: menor ataque de microrganismos e diminuição da respiração dos grãos. Entretanto, a redução da quantidade de água dos grãos é apenas um dos requisitos para um armazenamento seguro, que deve estar associado a outras técnicas de pós-colheita como a limpeza dos grãos, limpeza dos equipamentos e das estruturas de armazenamento, controle de pragas e da temperatura de armazenamento (WU et al., 2020; CORADI et al., 2016a; PARAGINSKI et al., 2014a).

O teor de água em que os grãos começam a respirar mais intensamente é chamado de umidade crítica de armazenamento (14,5-15%). Quando o teor de água dos grãos excede um valor crítico, forma-se orvalho, iniciando atividades de hidrólise, respiração e enzima (JUODEIKIENE et al., 2011). Devido aos fatores ambientais físicos, químicos e biológicos, grãos e outros alimentos crus podem começar a se deteriorar imediatamente após a colheita (KALETA; GÓRNICKI, 2013).

Durante o período de armazenamento, o teor de água dos grãos varia em função dos grãos que tendem ao equilíbrio higroscópico, mudando de acordo com a umidade relativa e a temperatura do ar (LIMA et al., 2016).

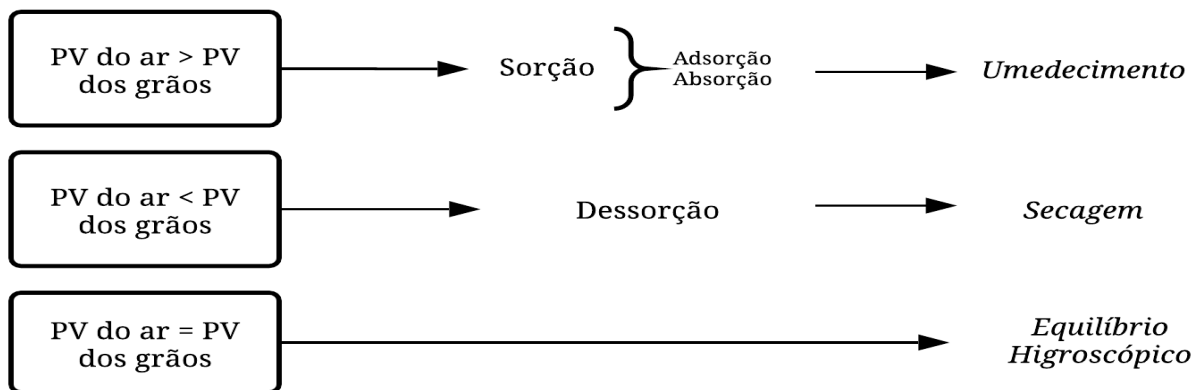
A umidade de equilíbrio higroscópico (U_e) e a perda de matéria seca (P_{ms}) são parâmetros comumente utilizados para determinar o conteúdo de água para garantir um armazenamento seguro, bem como prever e a capacidade de armazenamento de diferentes produtos (CHITRAKAR et al., 2006; CORADI et al., 2015a).

3.3.1.2.1 Umidade de equilíbrio Higroscópico (U_e)

O equilíbrio higroscópico caracteriza-se pelo teor de água no qual a pressão de vapor d'água no produto é igual à pressão de vapor do ar que o envolve. Os produtos agrícolas possuem a propriedade de realizar trocas de água sob a forma de vapor, com o ambiente que os envolve. Essas trocas podem acontecer por meio do ganho ou da perda de água, fenômenos conhecidos, respectivamente, por sorção e dessorção (Figura 6), de acordo com as características higroscópicas do produto e do ar. A afinidade existente entre a água e os outros componentes (gordura, amido, açúcar, proteínas, etc.) de um produto define sua higroscopicidade (BROOKER et al., 1992).

Portanto, faz-se importante o conhecimento das relações existentes entre o produto, a temperatura e a umidade relativa do ar objetivando estabelecer condições que amenizem prováveis alterações físicas, químicas, microbiológicas e fisiológicas durante o armazenamento.

Figura 6 - Pressão de vapor e transferência de água entre produtos agrícolas e ar.



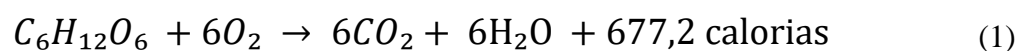
FONTE: Autora.

Para um produto com determinada composição, a relação de teor de umidade de equilíbrio (U_e) descreve como o teor de água dos grãos muda com a umidade relativa (UR) e a temperatura do ar que envolve o material. Para materiais higroscópicos a uma temperatura constante, a U_e aumenta à medida que a UR aumenta. Para uma UR constante, a U_e diminuiu à medida que a temperatura aumenta. (BROOKER et al., 1992).

3.3.1.2.2 Processo respiratório

Os grãos, depois de colhidos, continuam a viver e, como todos os organismos vivos, eles respiram, acarretando no incremento na taxa respiratória, esta qual é proporcional ao aumento da temperatura, que depende diretamente do teor de água dos grãos.

Esse processo oxidativo desencadeia transformações contínuas nos grãos, uma vez que a matéria orgânica, quando em contato com o oxigênio, transforma-se em CO_2 e H_2O , liberando energia em forma de calor, resultando em um ambiente mais propício para a infestação dos insetos-praga, ácaros, infecção por fungos, variações físico-químicos e fisiológicas, entre outros problemas. A combustão completa da glicose está especificada a seguir:



A respiração do grão ocasiona o consumo da sua matéria seca e da consequente perda de nutrientes, além disso, ocorre a geração de CO₂. Para a determinação da perda de matéria seca ao longo do armazenamento estas quantidades molares foram determinadas por meio das concentrações de CO₂ produzido e de O₂ presente dentro dos silos ao longo do período de armazenamento (SANTOS et al., 2012).

A massa de grãos armazenadas em um ecossistema com a presença de oxigênio intergranular submete-se a um processo respiratório (MAIER et al., 2010). A concentração de CO₂ e a liberação de calor e água ocorrem em função da intensidade do processo respiratório da massa de grãos (HUANG et al., 2013). A intensidade da respiração da massa de grãos ocorre em função das características intrínsecas e extrínsecas do produto, como teores de água e temperaturas dos grãos, temperatura do ar e umidade relativa intergranular e do ambiente externo de armazenamento, bem como, a característica da própria estrutura (NEETHIRAJAN et al., 2010).

O crescimento do molde durante o armazenamento praticamente zera em valores de UR inferiores a 70% (SULEIMAN et al., 2013). Logo, o teor de água para um armazenamento seguro é definido como o teor de água em equilíbrio com ar intergranular com uma UR em torno de 65-67%. Uma vez que os fungos estão ativos (ou seja, o produto é armazenado acima do teor de água máximo para um armazenamento seguro), a respiração aumenta produzindo calor e umidade que aumentam o teor de água e a temperatura do material acelerando assim o processo de deterioração (BROOKER et al., 1992; JIAN et al., 2014; OCHANDIO et al., 2017).

A respiração dos microrganismos está associada à decomposição de carboidratos, gorduras e outros compostos dos produtos armazenados, e geralmente é quantificada como P_{ms} (RUKUNUDIN et al., 2004; JIAN et al., 2014).

3.3.1.2.3 Perda de matéria seca

A perda de matéria seca ou quebra técnica acontece na massa de grãos ou sementes armazenadas e diz respeito a perda de peso ao longo do período de armazenamento. Esta perda ocorre devido às reações químicas de oxidação, durante o processo respiratório, as quais consomem energias acumuladas sob forma de compostos orgânicos como os açúcares, amidos e outros, diminuindo de forma efetiva a massa e, portanto, o peso do produto (KALETA; GÓRNICKI, 2013).

Para Cardoso et al. (2012), o processo de deterioração é inevitável, mas pode ser retardado dependendo das condições de armazenamento e das características do grão ou

semente. A liberação de CO₂ pelos grãos representa a quebra técnica do produto, sendo que a presença de fungos acelera este processo, ainda mais rapidamente em ambientes úmidos e quentes. A quebra técnica pode ser ocasionada devido ao ataque de insetos, pássaros ou roedores, movimentação do produto, tipo de estrutura armazenadora, entre outros fatores (BAUDET; VILLELA, 2000).

O nível aceitável de perda de matéria seca é controverso, mas alguns autores assumem valores de 0,1% a 0,5% (BERN et al., 2002; ATUNGULU et al., 2017; SULEIMAN et al., 2018). No Brasil, levando em conta experiências práticas em unidades de armazenamento, foi estabelecido um índice oficial de quebra técnica de 0,15% por mês de armazenamento (BAUDET; VILLELA, 2000).

3.3.1.5 Insetos-praga

O ataque de insetos-praga é a principal causa de perda dos grãos durante a fase de armazenamento, principalmente nas regiões tropicais e subtropicais, onde as altas temperaturas e umidade relativa favorecem o desenvolvimento de pragas, que causam perdas quantitativas e qualitativas nos grãos, bem como, redução de peso/volume e redução nutricional dos grãos (CARNEIRO, 2019).

Temperaturas entre 27 e 34 °C são ideais para o desenvolvimento desses insetos-praga, em contrapartida, temperaturas abaixo de 16 °C paralisam ou retardam o desenvolvimento da maioria das espécies. As principais pragas de armazenamento pertencem a ordem Coleoptera e Lepidoptera, responsáveis por perdas totais em armazéns quando não controladas (PROCÓPIO et al., 2015).

O gênero *Sitophilus* spp. contém três espécies consideradas importantes pragas de grãos armazenados, *S. zeamais*, *S. oryzae* e *S. granarius*. No Brasil *S. zeamais* é a principal praga de cereais armazenados, principalmente do milho. Dados indicam que cerca de 10% dos grãos já vem infestados da lavoura, agravando a infestação durante o armazenamento, resultando em perdas de até 50% da produção (SULEIMAN et al., 2015; NORAMBUENA et al., 2016).

3.3.1.5.1 *Sitophilus zeamais*

Mais conhecido como gorgulho-do-milho, o *Sitophilus zeamais* (Figura 7) é um besouro pequeno, de corpo compacto, pertencente à família Curculionidae. É um inseto cosmopolita conhecido por atacar grãos, principalmente cereais, como trigo, arroz, aveia, cevada e milho.

Além dos danos físicos, por ser uma espécie primária permite infestações secundárias, devido as injúrias feitas nos grãos, facilitando a entrada de organismos oportunistas, como fungos e bactérias (PROCÓPIO et al., 2015; NORAMBUENA et al., 2016), sendo considerada uma das principais pragas de grãos armazenados mundialmente.

No Brasil, o *Sitophilus zeamais* é a principal praga de grãos de milho armazenado, apesar de atacar os outros cereais, no milho sua fecundidade média é maior, caracterizando consideráveis perdas econômicas. As características biológicas como o elevado potencial biótico e a capacidade de sobreviver em grandes profundidades na massa dos grãos favorecem seu desenvolvimento e adaptação. Além disso, apresentam infestação cruzada, atacam a planta ainda em campo e durante o armazenamento. As fêmeas perfuram os grãos para depositar seus ovos, cerca 150 ovos por fêmea. Após a eclosão as larvas se desenvolvem até a fase adulta, em um período de 25 a 30 dias. Os adultos possuem um prolongamento cefálico em forma de tromba, chamada de rostró, contendo as peças bucais na parte distal. O comprimento é 3 a 4 mm, facilitando o acesso até as partes mais profundas dos grãos (PROCÓPIO et al., 2015).

Figura 7 - *Sitophilus zeamais* A) adulto e B) adulto em tamanho real.



FONTE: Carneiro (2019).

Tanto as larvas nos seus diferentes instares como os adultos de *S. zeamais* causam danos irreversíveis a cultura do milho, podendo destruir os grãos por completo. O fato de o inseto apresentar infestação cruzada agrava o caso, pois os grãos podem vir infestados do campo para

o armazém, onde o inseto encontrará condições altamente favoráveis para o desenvolvimento do seu potencial biótico (CARNEIRO, 2019).

A elevação da população de *S. zeamais* em um local de armazenamento pode promover o aquecimento, criando bolsas de calor que favoreçam a multiplicação e a ação de microrganismos como fungos saprofíticos (TREMATERRA et al., 2013; JAIROCE et al., 2016).

3.3.1.6 Microorganismos

Como o milho é um componente básico da dieta em muitas regiões do mundo, sua produção precisa ser mantida com altos padrões em termos de qualidade sensorial, nutricional e microbiológica (GARCIA-CELA et al., 2019). Todavia, a colonização por fungos em grãos é uma das principais causas de deterioração do produto, reduzindo seu teor de matéria seca e possibilitando a ocorrência de micotoxinas.

Os fungos presentes nos grãos armazenados são frequentemente divididos em dois grupos: (i) fungos de campo e (ii) fungos de armazenamento. Os primeiros invadem os grãos ainda no campo, necessitando de umidade relativa em torno de 90-100% para seu crescimento (ROCHA et al., 2020). O tempo de sobrevivência desses fungos está diretamente relacionado com as condições de ambiente do local de armazenamento. Os fungos de armazenamento, por sua vez, estão presentes nos grãos recém-colhidos, geralmente em porcentagens muito baixas e são capazes de sobreviver em ambiente com baixa umidade, proliferando em sucessão aos fungos de campo e causando a deterioração dos grãos.

As micotoxinas (mykes = fungo; toxicun = veneno) são metabólitos secundários de alguns fungos, de baixa massa molecular (~ 700 u), caracterizando-se como potencial ameaça à saúde humana e animal quando alimentos contaminados com as mesmas são ingeridos, causando várias doenças e até morte (ANDRADE et al., 2015).

Os principais fungos produtores de micotoxinas, conhecidos como micotoxigênicos, correspondem ao gênero *Aspergillus*, *Penicillium* e *Fusarium* (AIKO; MEHTA, 2015; SILVA et al., 2015a; KRNJAJA et al., 2017). Algumas micotoxinas e suas espécies fúngicas estão listadas na Tabela 3.

Devido à sua ampla gama de propriedades físicas e químicas as micotoxinas são compostos químicos estáveis que não podem ser destruídos durante a maioria das operações de processamento de alimentos. A avaliação antecipada desses contaminantes e a identificação das principais espécies de fungos toxicogênicos são importantes, não apenas para avaliação da

qualidade dos alimentos, mas também para o desenvolvimento de estratégias de controle para garantir a segurança dos alimentos (SADHASIVAM et al., 2017).

Tabela 3 - Micotoxinas, fungos produtores e ocorrência em milho e em outros alimentos.

Micotoxinas	Fungos produtores	Alimentos
Aflatoxinas	<i>Aspergillus flavus</i> , <i>A. parasiticus</i>	Milho, amendoim, figo, nozes, oleaginosas, leite e derivados
Fumonisinias	<i>Fusarium verticillioides</i> , <i>F. proliferatum</i> , <i>Alternaria alternata</i> f. sp. <i>Lucoopersici</i>	Milho, chá-preto
Zearalenonas	<i>Fusarium graminearum</i> , <i>F. culmorum</i> , <i>Fusarium esquiseti</i>	Milho, cevada, trigo, sorgo, arroz, centeio
Deoxinivalenol	<i>Fusarium graminearum</i> , <i>F. culmorum</i> , <i>Fusarium esquiseti</i>	Milho, cevada, centeio, aveia, trigo
T2	<i>Fusarium sporotrichioides</i> , <i>Myrothecium</i> , <i>Phomopsis</i> , etc.	Milho e outros cereais
Ochratoxinas	<i>Aspergillus ochraceus</i> , <i>A. carbonarius</i> , <i>Penicillium</i> sp., <i>Fusarium</i> sp	Milho, cevada, café, arroz, feijão, vinho, figo, trigo
Esterigmatocistina	<i>Aspergillus</i> sp., <i>Bipolaris</i> , <i>Chaetomium</i>	Cereais, café, queijo
Citrinina	<i>Penicillium citrinum</i>	Milho, cevada, trigo, arroz, aveia

Fonte adaptada: SILVA et al. (2015a).

3.4 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO ARMAZENADOS

As perdas de grãos na pós-colheita devido à deterioração durante o armazenamento continuam sendo um grande problema em todo o mundo (HUANG et al, 2013). O monitoramento adequado da qualidade dos grãos armazenados e a consequente detecção precoce dos estragos visa reduzir perdas quanti e qualitativas, diminuir a produção de micotoxinas na cadeia alimentar e evitar perdas financeiras, a partir do gerenciamento oportuno do armazenamento (ILELEJ et al., 2006).

3.4.1 Termometria

Os sistemas de monitoramento das condições de armazenamento comumente utilizados limitam-se ao uso da termometria e inspeção manual e visual (NAVARRO; NOYES, 2002; GONZALES et al., 2009). O sistema de termometria é de suma importância, visto que a temperatura é um dos principais fatores que interferem a qualidade dos grãos armazenados. Esse sistema é constituído por uma rede de sensores de temperatura, dispostos simetricamente na massa de grãos (KHATCHATOURIAN et al., 2017; BINELO et al., 2019). Avanços

tecnológicos quanto ao emprego de recursos de comunicação wireless e automação de processos, utilizando microprocessadores, atuadores e sensores digitais, têm proporcionado melhora nas ferramentas de monitoramento e gestão dos ecossistemas de armazenagem de grãos a granel, como os silos e armazéns.

Os cabos termométricos são utilizados pois os microrganismos produzem grande quantidade de calor no local de deterioração, no entanto, o monitoramento da temperatura geralmente não é sensível o suficiente devido às baixas difusões térmicas em grãos a granel, acarretando na detecção da variação de temperatura até poucos metros de distância, logo, o avanço da deterioração muitas vezes já é significativo quando detectado (GONZALES et al., 2009; FERRASA et al., 2010). Tratando-se da inspeção manual e visual, esta pode ser tendenciosa e varia de operador para operador.

3.4.2 Respiração da massa de grãos

Além do monitoramento da temperatura, estudos relataram que aumentos na concentração de dióxido de carbono (CO_2) em grãos a granel é outro indicador de deterioração de grãos (MOOG et al. 2010), devido à relação encontrada entre a atividade biológica e concentração de CO_2 no ar intersticial dos grãos armazenados (KARUNAKARAN et al., 2001, ZHANG et al., 2014; RAUDIENE et al., 2017).

Os sensores de CO_2 outrora eram caros, volumosos e imprecisos, entretanto, recentemente foram aperfeiçoados tecnologicamente, o que os tornou precisos e acessíveis (MAIER et al., 2006). Nos últimos anos, devido à sua sensibilidade e confiabilidade, a medição da concentração de CO_2 como indicador da qualidade de alimentos durante o armazenamento atrai cada vez mais atenção. Vários métodos podem ser usados para medir a concentração de CO_2 , tais como absorção química, cromatografia gasosa, sensores eletroquímicos e métodos ópticos (NEETHIRAJAN et al., 2009). Estes métodos têm precisão e sensibilidade diferentes, e são usados para medir CO_2 em diferentes condições (ZHANG et al., 2014) e para diferentes objetivos (REUSS et al., 1994).

Os dispositivos de medição de concentração de CO_2 mais comuns utilizam cromatografia gasosa, espectrometria de massa, sensores eletroquímicos ou ópticos (ZHANG et al., 2014; NEETHIRAJAN et al. 2009; REUSS et al., 1994; NEETHIRAJAN et al., 2010). A cromatografia gasosa e a espectrometria de massa são técnicas de medição bastante complexas, normalmente utilizadas em condições laboratoriais. Dependendo do princípio de medição, os sensores de CO_2 podem ser divididos em ópticos e eletroquímicos. Sensores

eletroquímicos, como óxido de metal, NASICON (condutor super íon de sódio) ou polimérico, alteram parâmetros elétricos como a impedância, tensão potencial, entre outros, sendo esta alteração medida por um circuito elétrico (NEETHIRAJAN et al., 2010).

Os sensores ópticos são classificados em absorção de infravermelhos (IR), fibra e sol-gel. Os sensores de gás de fibra óptica têm a camada quimicamente sensível na extremidade da fibra óptica, que muda suas propriedades ópticas de acordo com a concentração de CO₂. Os sensores ópticos de CO₂ sol-gel utilizam a fita com um indicador de pH fluorescente. Com esta fita é medida a intensidade de luminosidade. Os sensores ópticos IR podem ser divididos em espectroscopia de infravermelhos dispersiva, não dispersiva e Fourier (FTIR). O princípio de todos os instrumentos de espectroscopia IR é a medição da absorção em um ou mais comprimentos de onda (NEETHIRAJAN et al., 2010).

A maioria dos sensores de CO₂ vendidos são sensores não dispersivos do tipo IR (NIR). Os sensores NIR são menos complexos na estrutura e mais fáceis de usar. O princípio de operação é baseado na absorção de CO₂ na faixa de RI. Os sensores de gás infravermelho se destacam de outros dispositivos de medição analítica devido ao seu menor custo, tamanho pequeno, gestão simples do processo e possíveis medições contínuas (NEETHIRAJAN et al. 2009).

Faixas mais amplas de temperatura e umidade relativa são normalmente necessárias para sensores utilizados para monitoramento de gases na agricultura e na indústria alimentícia. A presença de vários microrganismos e outras formas biológicas torna a monitorização de gases ainda mais complexa. No entanto, somente métodos que podem ser utilizados para o monitoramento in situ de grãos armazenados permitem a detecção de suas características de deterioração em estágios iniciais (RAUDIENE et al., 2017).

Como os grãos são organismos vivos, é natural que ocorra a produção de CO₂ durante o armazenamento. Alterações na concentração de CO₂ podem ser detectadas com sensibilidade em cada ponto de amostragem e podem ser consideradas como um indicador das atividades de insetos no armazenamento de grãos (ZHANG et al., 2014). Segundo Garcia-Cela (2019) a produção de CO₂ é maior nos grãos contaminados por fungos. Sendo assim, a concentração de CO₂ pode ser usada como indicador precoce do início da atividade de fungos e consequente produção de micotoxinas na massa de grãos.

De acordo com Maier et al. (2006) e Ileleji et al. (2006) o monitoramento da termometria por si só não é um indicador confiável das condições dos grãos nas estruturas de armazenamento, enquanto que os sensores de CO₂, utilizados na parte superior do silo, são uma

alternativa viável como “aviso prévio” da deterioração dos grãos e fornecem informações importantes para a tomada de decisão.

Em estudo realizado por Maier et al. (2010), com grãos de milho, a resposta da utilização de sensores de CO₂ em condições de campo também foi positiva. Salientaram ainda que a detecção da deterioração pelos sensores de CO₂ se dá muito antes que os sensores tradicionais como inspeções visuais, cabos de odores e temperatura, o que evidencia sua eficácia para proteger as perdas econômicas durante o armazenamento.

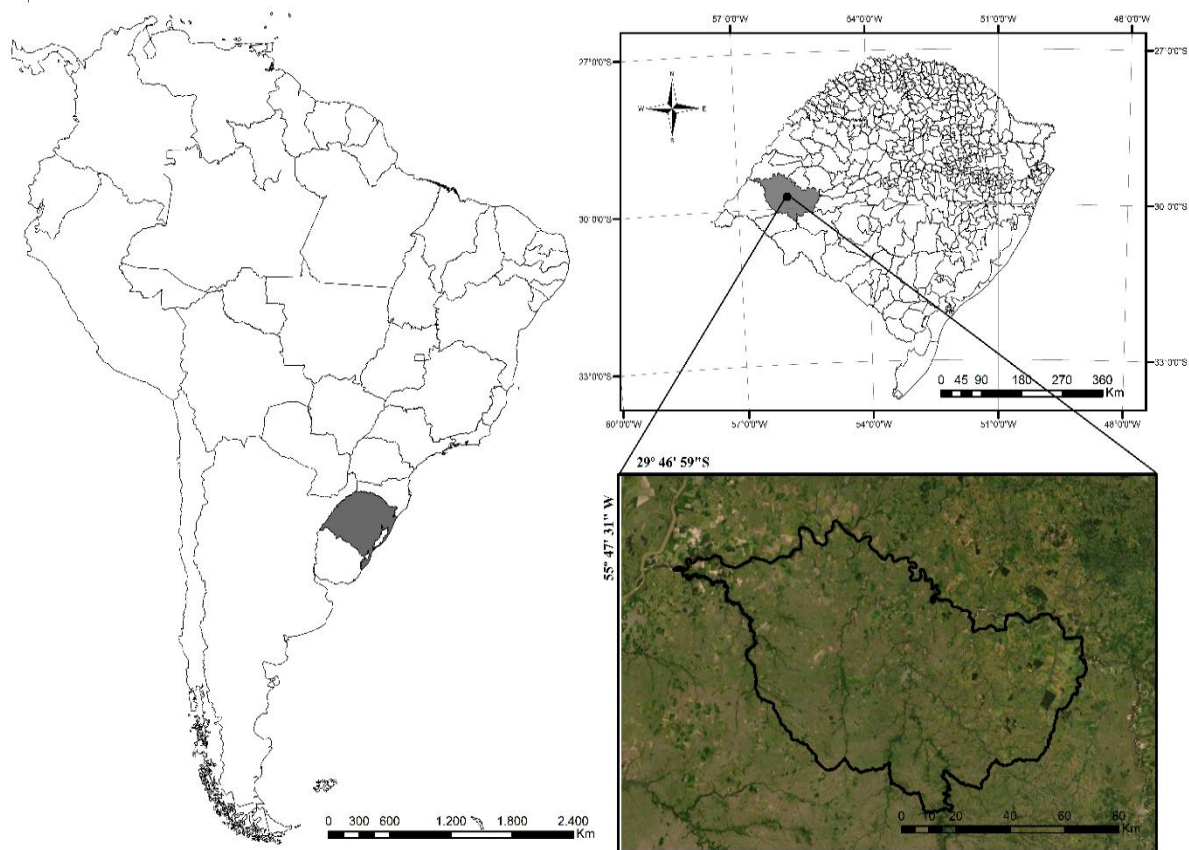
A concentração de CO₂ medido em um volume armazenado pode ser comparada com a concentração de CO₂ do ar ambiente (cerca de 400 ppm) como padrão para interpretar as leituras (IPCC, 2014).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento foi realizado no município de Alegrete, região Sul do Rio Grande do Sul, Brasil (Figura 8), latitude $29^{\circ} 46' 59''\text{S}$, longitude $55^{\circ} 47' 31''\text{W}$ e altitude de 102 metros, em conjunto com o Laboratório de Pós-Colheita (LAPOS) da Universidade Federal Santa Maria (UFSM), Campus Cachoeira do Sul (CS), Laboratórios do curso de Engenharia de Alimentos da Universidade de Passo Fundo (UPF), Laboratório de Processos Ambientais do PPGEQ da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e Laboratório de Análises Micotoxicológicas (LAMIC).

Figura 8 - Mapa de localização do município de Alegrete/RS - Mapa confeccionado no software ArcGIS 10.6.1.



FONTE: Autora.

Os grãos de milho utilizados foram obtidos na Agropecuária Três Pontas, localizada no município de Manoel Viana/RS, colhidos mecanicamente com teor de água em torno de 30% e secos em secador de amostras marca Staiger, com temperatura do ar de secagem de 40°C até

os teores de água de 16, 14 e 12%. Os grãos foram limpos manualmente e armazenados em protótipos de silos verticais (Figura 9) com 4 aberturas superiores (simulando os suspiros comumente encontrados nos silos metálicos) e capacidade de 25 litros, preenchidos com aproximadamente 20kg de amostra.

Figura 9 - Protótipos de silos verticais utilizados para o armazenamento de grãos de milho.



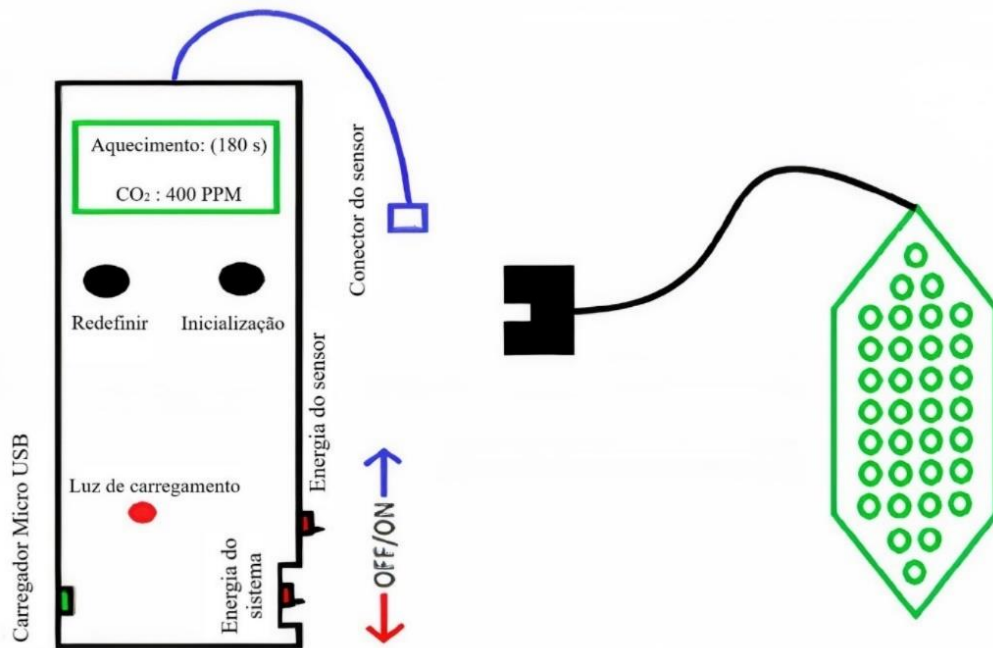
FONTE: Autora.

Para amostragem, em paralelo, os grãos foram armazenados no mesmo ambiente em recipientes metálicos com capacidade de 45 litros (preenchidos com cerca de 20kg), com 4 aberturas nas tampas para simular as condições dos protótipos. Os dados de concentração de CO₂ da massa de grãos e temperatura e umidade relativa do ar ambiente, temperatura e umidade relativa do ar intergranular foram coletados diariamente, três vezes ao dia: manhã (9h), tarde (15h) e noite (21h).

Para a medição de dióxido de carbono (CO₂) foram utilizados sensores modelo MZ-19 com infravermelho não dispersivo tipo NIR (Figura 10), com faixa de medição de 0 a 5000 ppm e precisão de +- 3% do valor lido, instalados na parte superior e interna de cada silo armazenador, de maneira suspensa no chapéu e acima da massa de grãos. A leitura da concentração de CO₂ foi realizada em display do tipo CO₂ Reader com alimentação independente e bateria interna. Os sensores que acompanham o CO₂ Reader foram devidamente calibrados na faixa de 400 ppm, considerando a concentração em ambiente natural, seguindo os procedimentos descritos pelo fabricante. Antes das instalações foram realizados testes

preliminares para coletar informações dos sensores e verificar se ambos estavam funcionando adequadamente.

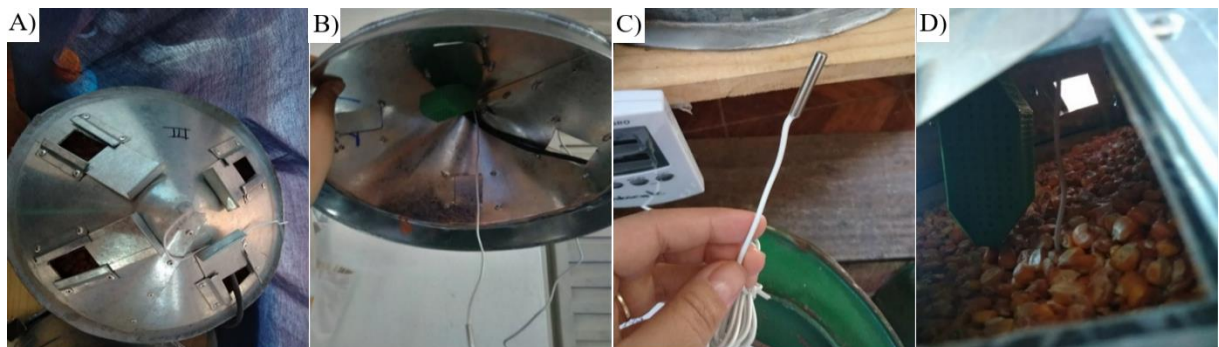
Figura 10 - Sensor modelo MZ-19 com infravermelho não dispersivo tipo NIR utilizado para a medição de dióxido de carbono (CO₂).



FONTE: Autora.

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar ambiente, temperatura e umidade relativa do ar intergranular foram obtidos através de um termohigrômetro marca TLX, modelo DTH-16 (Shenzhen Tonglixing Technology Co., ltd, Guangdong / China) instalado no centro da massa de grãos (Figura 11).

Figura 11 - A) Aberturas superiores do silo; B) Instalação do Sensor modelo MZ-19 na parte superior e interna do silo e do sensor do Termohigrômetro no centro da massa de grãos; C) Sensor do Termohigrômetro e D) Visão do Sensor modelo MZ-19 e sensor do Termohigrômetro.



FONTE: Autora.

4.1.1 Perda de matéria seca

A determinação da perda de matéria seca foi realizada a partir da diferença de peso dos grãos de milho no enchimento e descarregamento dos protótipos de silos verticais (0 e 12° mês) através do uso das Eq. 2 e 3 (SANTOS et al., 2012).

$$Ms = \left[1 - \left(\frac{U}{100} \right) \right] * Pg \quad (2)$$

em que Ms é a matéria seca (g); U é o teor de água (%) e Pg é a massa inicial dos grãos (g).

$$Pms = \left(\frac{MS_{início} - MS_{final}}{MS_{início}} \right) * 100 \quad (3)$$

em que P_{ms} é a perda de matéria seca (%) e MS_{início} e MS_{final} são a matéria seca no início e no final do armazenamento (g).

4.1.1.1 Estimativa de perda de matéria seca

O modelo utilizado para a estimativa da perda de matéria seca pode ser representado pela Eq. 4 (SANTOS et al., 2012).

$$Pms = 100(CO_2 - O_2) \left(\frac{\varepsilon P Wg}{2 \rho g (1 - Mcd) R T} \right) \quad (4)$$

em que P_{ms}, é a perda de matéria seca (%); O₂ e CO₂ são, respectivamente, a concentração de oxigênio comumente encontrada no ar (21%) e de CO₂ medida durante o armazenamento (v/v); ε é a porosidade intergranular (%); P é a pressão atmosférica local (96 kPa); Wg e Pg são a massa molar da glicose (180 kg kmol⁻¹) e massa específica aparente dos grãos (kg m⁻³); Mcd é o teor de água dos grãos (decimal b.u); R é a constante dos gases perfeitos (8,314 kJ kmol⁻¹ K⁻¹) e T é a temperatura intergranular (°K).

4.1.2 Umidade de equilíbrio higroscópico

O cálculo de umidade de equilíbrio higroscópico dos grãos de milho armazenados foi realizado através das equações 5 e 6:

- Para umidade relativa do ar entre $0 < UR \leq 52 \%$

$$U_e = \frac{7,4776 * UR^{0,4584}}{\ln (T)} \quad (5)$$

- Para umidade relativa do ar entre $52 < UR < 100 \%$

$$U_e = \frac{21,2198 * \exp(0,0146 * UR)}{\ln (T)} \quad (6)$$

em que U_e é a umidade de equilíbrio higroscópico; UR é a umidade relativa do ar (%) e T é a temperatura do grão (°F).

4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado, sob esquema fatorial (3x5), com três repetições, sendo: 3 teores de água iniciais (16% (S1), 14% (S2) e 12% (S3)) e 5 tempos de armazenamento (0, 3, 6, 9 e 12 meses), totalizando 15 tratamentos. No início do armazenamento (tempo 0) e a cada tempo de armazenamento foram coletados 2kg de amostra simples de cada tratamento, as quais foram acondicionadas em sacos de polietileno de 0,2 mm de espessura e mantidas resfriadas a -10 °C para posterior análises laboratoriais.

4.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS GRÃOS

4.3.1 Análises físicas

4.3.1.1 Classificação dos grãos

A classificação dos grãos foi realizada de acordo com a Instrução Normativa MAPA nº 60, de 22 de dezembro de 2011, publicada no D.O.U de 23.11.2011 (BRASIL, 2011). Os parâmetros avaliados foram: percentual de grãos avariados (ardidos, chochos ou imaturos, fermentados, germinados, gessados e mofados), quebrados, matérias estranhas e impurezas (MEI) e carunchados.

4.3.1.2 Massa específica aparente

A massa específica aparente ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) foi determinada com o auxílio de uma balança de peso hectolitro, da marca *Dallemole*, com capacidade de 0,25 L (250ml), a partir de oito repetições para cada tratamento. Após o preenchimento e pesagem determinou-se a massa específica aparente (ρ_{ap}) por meio da relação da massa (kg) e volume (m^3) (BRASIL, 2009).

4.3.1.3 Porosidade intergranular

A porosidade intergranular foi obtida pelo método direto, em que foram utilizadas duas provetas de 100mL e óleo de soja. Na primeira proveta foram colocados os grãos até atingirem a marca de 100mL e na outra 100mL de óleo de soja. O óleo foi colocado junto aos grãos na primeira proveta. Conhecendo-se o volume de líquido necessário para preencher os espaços vazios da massa de grãos, chega-se na porosidade intergranular (%).

4.3.1.4 Massa específica unitária

A massa específica real ou unitária (ρ_u), expressa em kg m^{-3} , foi obtida em função da porosidade (ϵ) e da massa específica aparente (ρ_{ap}) de acordo com a Eq. 5, descrita por Mohsenin (1986).

$$\rho_u = \frac{\rho_{ap}}{(1-\epsilon)} \quad (7)$$

em que ρ_{ap} é a massa específica aparente, kg m^{-3} ; ρ_u é a massa específica unitária, kg m^{-3} e ϵ é a porosidade intergranular, em decimal.

4.3.1.5 Peso de mil grãos

O peso de mil grãos foi determinado através da contagem de oito repetições de 100 grãos e pesagem em balança analítica de acordo com as Regras de Análise de Sementes (BRASIL, 2009). A média obtida foi multiplicada por 10 e os resultados foram expressos em gramas.

4.4.1.6 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica foi determinada a partir de quatro repetições de 25 sementes, selecionadas aleatoriamente, estas foram pesadas em balança analítica de precisão (0,001 g) e, posteriormente, imergidas em 75 mL de água deionizada em copos plásticos. Após este procedimento, realizou-se a leitura inicial com o condutímetro tipo caneta, marca AKSO. Em seguida, as amostras foram mantidas em BOD a 25 °C, por 24 horas. Logo após, as amostras foram agitadas para homogeneização dos exsudados liberados na água e realizou-se a leitura final. As leituras foram transformadas pela seguinte fórmula:

$$CE = \frac{(Leitura\ final - Leitura\ inicial)}{Peso\ de\ 25\ grãos} \quad (8)$$

Os resultados são expressos em microsiemens por centímetro por grama ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) (KRYZANOWSKI et al., 1991).

4.3.1.7 Germinação

O teste de germinação foi conduzido com quatro repetições de 50 grãos para cada tratamento, em rolos do tipo papel “*Germitest*”, sendo estes acondicionados em germinador com temperatura constante de 25 ± 2 °C após a sementeira dos tratamentos. A quantidade de água adicionada foi equivalente a 2,5 vezes a massa do substrato seco, visando ao umedecimento adequado e, conseqüentemente, à padronização do teste. As contagens foram feitas no sétimo dia após a sementeira, de acordo com os critérios estabelecidos nas Regras de Análise de Sementes (BRASIL, 2009) e os resultados foram expressos em percentagem pela média das repetições.

4.3.1.8 Micotoxinas

As amostras para determinação de micotoxinas foram enviadas para o LAMIC – Laboratório de Análises Micotoxicológicas da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria/RS. As micotoxinas analisadas foram Aflatoxinas B1, B2, G1 e G2, Fumosinas B1 e B2, Tricotecenos DON, DAS, 3-AcDON, 15-AcDON, Toxina T-2, Toxina HT-2, Nivalenol, Fusarenon-X, Ocratoxina A, Zearalenona, Ácido Ciclopiazônico e Ergosterol através da

metodologia de Cromatografia líquida de alta eficiência acoplada a espectrometria de massas (LC-MS/MS).

4.3.2 Análises físico-químicas

As análises físico-químicas foram realizadas nos laboratórios do curso de Engenharia de Alimentos da Universidade de Passo Fundo (UPF), Passo Fundo/RS. Para a realização dessas análises, os grãos de milho foram moídos em Moinho com Rotor Vertical (martelos fixos), marca Marconi, modelo MA090/CF com a refrigeração ligada. Foi utilizada peneira de 60 mesh para uniformização da granulometria das amostras.

4.3.2.1 Composição centesimal

A determinação do conteúdo de proteína bruta, teor de água, extrato etéreo, fibra bruta, cinzas e amido dos grãos de milho moídos foi realizada por espectroscopia de infravermelho próximo (Metrohm, espectrômetro DS2500, Herisau, Suíça), denominado NIR, com alta precisão óptica, em triplicata.

4.3.2.2 Proteína solúvel

O teor da solubilidade proteica foi determinado segundo método descrito por Liu et al. (1992) com modificações. Em cada amostra de 0,5g de grãos moídos foram adicionados 25mL de água destilada, sendo as amostras e a água misturadas com o auxílio de agitador magnético durante 1 hora e posteriormente centrifugadas a 6080G durante 20 min a 20°C em centrífuga *High Speed Refrigerated Centrifuge CR22N*. Uma alíquota de 5mL do sobrenadante foi coletada e a determinação do teor de proteína solúvel foi realizada pelo método Kjeldahl, descrito pela AACCC (1995), o mesmo utilizado para avaliação do teor de proteína bruta. Os resultados foram obtidos utilizando o fator de conversão 6,25 e expressos em percentagem de proteína bruta, a partir da equação a seguir.

$$PS(\%) = \frac{Psob}{Pamostra} * 100 \quad (9)$$

em que PS (%) é o teor de proteína solúvel; P_{sob} é o teor de proteína do sobrenadante e P_{amostra} é o teor de proteína bruta dos grãos moídos.

4.3.2.3 *Acidez Lipídica*

O óleo foi extraído utilizando hexano como solvente em extrator Soxhlet, por refluxo de solvente em processo intermitente. O tempo de extração para cada cartucho foi de 8 horas. Após a extração, o hexano foi recuperado e o restante evaporado em estufa aquecida a 70°C para evitar a perda de compostos voláteis importantes no óleo. Posteriormente, 2g do óleo foi pesado em frasco erlenmeyer de 125 mL e adicionados 25 mL de solução de éter etílico-álcool etílico (2:1), juntamente com duas gotas da solução indicadora de fenolftaleína. Após, foi titulado com solução de hidróxido de sódio 0,01 M até o aparecimento da coloração rósea, a qual foi mantida por pelo menos 30 segundos. Os resultados foram expressos em mg de NaOH necessários para neutralizar 1g de ácido graxo livre (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 1985).

4.3.2.4 *Análise termogravimétrica (TG)*

A análise termogravimétrica ou termogravimetria (TG) foi realizada em equipamento termogravimétrico modelo *Simultaneous Thermal Analyzer STA 6000/8000* da marca Perkin Elmer, na faixa de 40 a 800 °C com varredura de 10 °C/min. em atmosfera de nitrogênio, gerando curvas de TG. A partir das curvas termogravimétricas, calcula-se a curva diferencial termogravimétrica (DTG) correspondente a derivada da curva TG em função ao tempo ou temperatura (REGO et al., 2019), esta qual permite a melhor visualização dos eventos de decomposição.

4.3.2.5 *Caracterização por Espectroscopia na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)*

Os ensaios de FTIR foram realizados em Espectrômetro de Infravermelho com Transformada de Fourier (Modelo Cary 630, Argilent Technologies, EUA). Operou-se o equipamento no modo de reflexão total atenuada (ATR) utilizando cristal de diamante, realizando 48 varreduras com uma resolução de 4 cm⁻¹ na faixa de número de ondas de 4000 a 500 cm⁻¹.

4.3.2.6 Propriedades de pasta

As características viscoamilográficas dos grãos moídos foram avaliadas com o analisador rápido de viscosidade (*Rapid Visco Analyser* (RVA) – Newport Scientific Instruments), usando programa *Thermocline for Windows versão 1.10*. O perfil utilizado foi o Standard Analysis 1. Para realização do teste, colocou-se o milho moído (4g corrigidas para 14% de umidade) diretamente no recipiente do RVA com 25ml de água destilada conforme descrito por Singh et al. (2004).

A partir das curvas obtidas, avaliou-se o Pico de Viscosidade, Quebra de Viscosidade, Viscosidade Final, Índice de Retrogradação, Tempo de Pico e Temperatura da Pasta. Os valores de viscosidade são obtidos em centipoise (cP) e apresentados em RVU, sendo que 1 RVU (unidade viscoamilográfica) equivale à aproximadamente 12 cP (BOOTH; BASON, 2007).

4.3.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As análises microscópicas dos grãos de milho foram realizadas usando um microscópio eletrônico de varredura (Carl Zeiss, Sigma 300 VP, Jena, Alemanha) com um filamento de emissão de campo (FEG, Field-Emission Gun) do tipo Schottky (filamento de tungstênio coberto com óxido de zircônio) equipado com um Coluna Gemini (Carl Zeiss, Sigma 300 VP, Jena, Alemanha). As imagens (as posições inferior e superior do secador estacionário foram analisadas) foram obtidas usando o detector secundário (SE2) no modo de alto vácuo (1×10^{-9} bar) com a energia de 1, 5 e 6 kV, distâncias de trabalho de 5 a 35 mm, um tamanho de abertura de 15 μm e diferentes ampliações. Para a espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS), foi utilizado um detector de raios-X EDS (Bruker, Quantax 200-Z10, Billerica, Massachusetts, EUA), que estava equipado com uma janela de quartzo de 10 mm^2 e o software ESPRIT.

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

4.4.1 Análise de variância

Os resultados obtidos foram avaliados estatisticamente com auxílio do programa SISVAR versão 5.8 e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 1 e 5% de probabilidade (FERREIRA, 2011).

4.4.2 Análise multivariada

Foi realizada uma análise multivariada de componentes principais e agrupamento com auxílio da linguagem de programação R (R CORE TEAM, 2021) com as bibliotecas "candisc" e "qgraph". Realizou-se a análise de variáveis canônicas para verificar a inter-relação entre as variáveis avaliadas e as condições de processamento. Essa técnica é semelhante aos componentes principais, mas permite considerar a variação residual entre repetições do mesmo tratamento. Foram estimados os coeficientes de correlação de Pearson para verificar a associação entre variáveis nas condições de processamento. A rede de correlação foi construída para expressar graficamente os resultados. Neste procedimento, as linhas verdes vinculam variáveis à correlação positiva e as linhas vermelhas unem variáveis negativamente correlacionadas. A espessura da linha é proporcional à magnitude da correlação.

Para facilitar a entrada de dados no Software R, os tratamentos foram delimitados de 1 a 15, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Delimitação dos tratamentos para entrada de dados no Software R.

Tratamento	Teor de água (%)	Tempo de armazenamento (meses)
1	16 (S1)	
2	14 (S2)	0
3	12 (S3)	
4	16 (S1)	
5	14 (S2)	3
6	12 (S3)	
7	16 (S1)	
8	14 (S2)	6
9	12 (S3)	
10	16 (S1)	
11	14 (S2)	9
12	12 (S3)	
13	16 (S1)	
14	14 (S2)	12
15	12 (S3)	

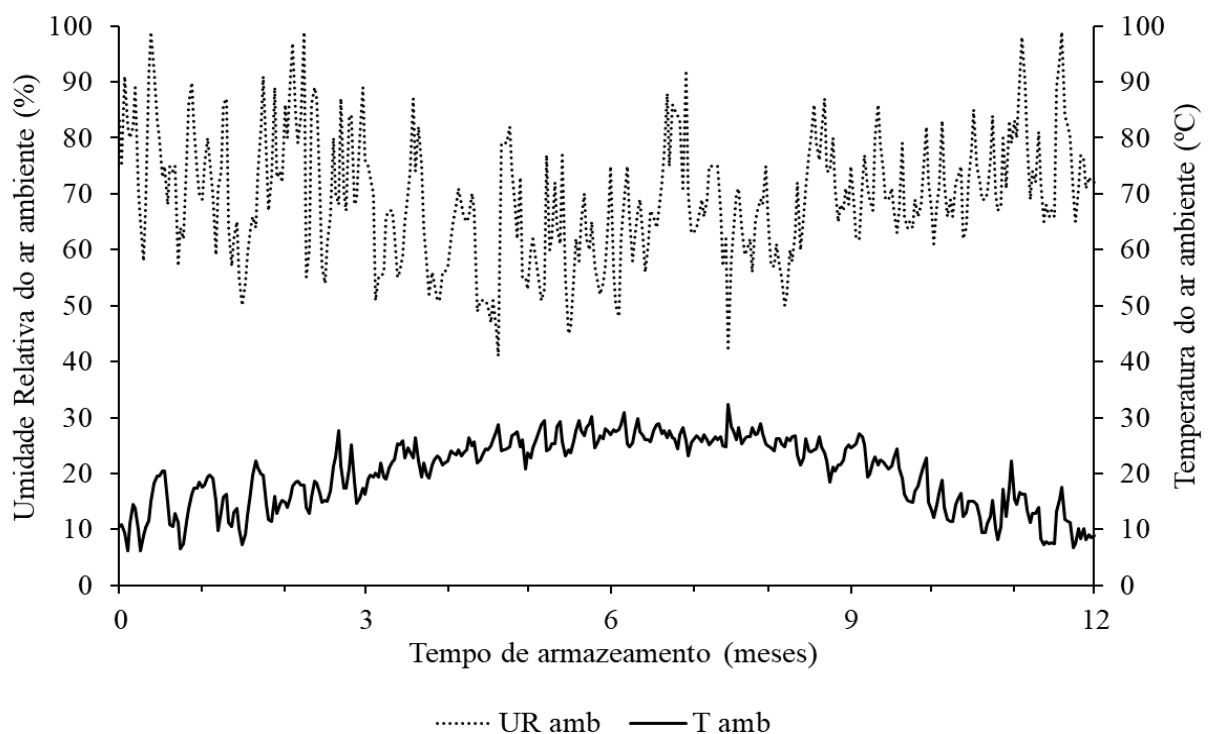
FONTE: Autora.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 MONITORAMENTO DOS GRÃOS ARMAZENADOS

Na Figura 12 observou-se as variações de temperatura e umidade relativa do ar ambiente ao longo do período de armazenamento. Verificou-se que a temperatura teve amplitudes de 6,1 a 35°C e a umidade relativa do ar de 30 a 99%, os quais podem ter influenciado no armazenamento dos grãos de milho em função do aumento ou diminuição das trocas gasosas com o ar intergranular.

Figura 12 - Temperatura e umidade relativa do ar ambiente obtidas ao longo do período de armazenamento dos grãos de milho.

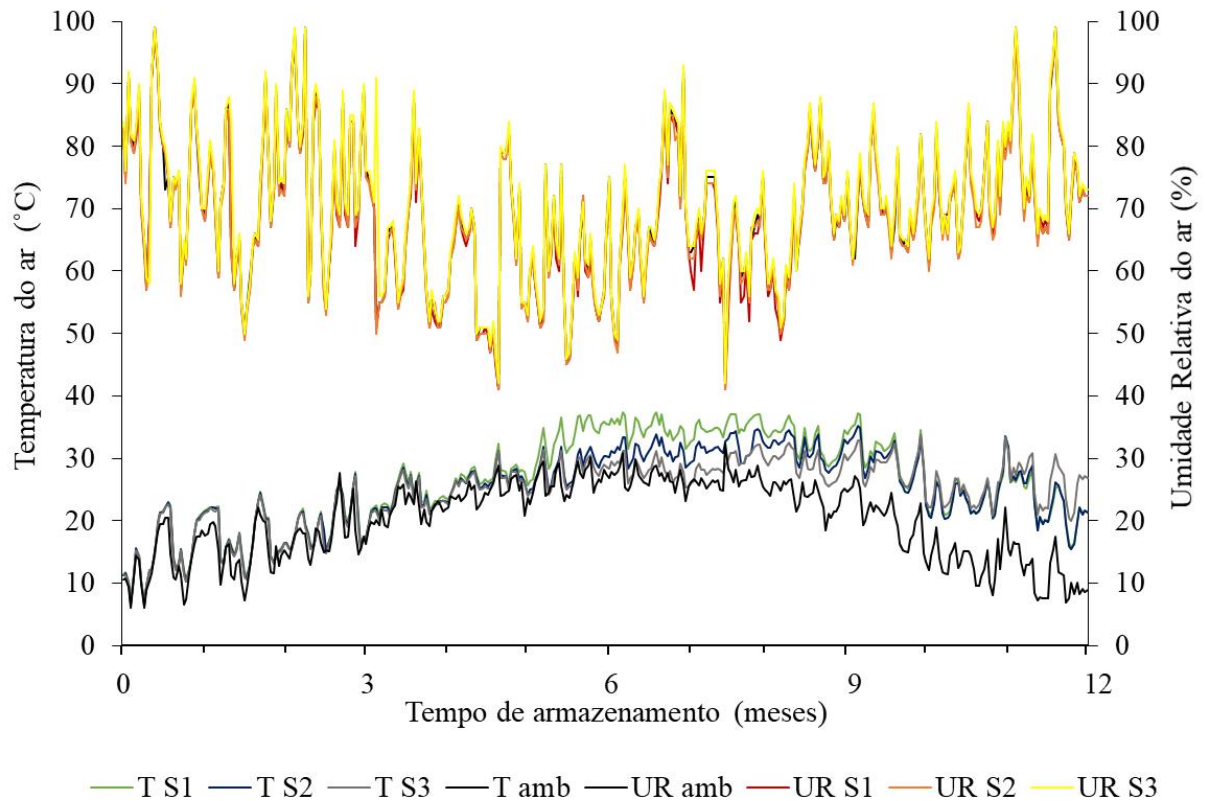


FONTE: Autora.

A temperatura e umidade relativa do ar ambiente e do ar intergranular ao longo dos 12 meses de armazenamento de grãos de milho são apresentadas na Figura 13. A umidade relativa do ar intergranular sofreu variações ao longo do armazenamento em todos os tratamentos (S1, S2 e S3), entretanto, entre os tratamentos e o ar ambiente pouca diferença foi observada. A temperatura do ar intergranular é um dos fatores mais importantes na conservação dos grãos armazenados, uma vez que a intensidade da respiração, a deterioração dos grãos e a perda de componentes nutricionais é acelerada com o seu acréscimo. Ao longo do armazenamento, a

temperatura do ar intergranular variou de 6,7 a 38,4, 6,5 a 35,8 e 6,4 a 34,5 °C para os tratamentos S1, S2 e S3, respectivamente. Entre os tratamentos, por sua vez, até os cinco meses de armazenamento, não foi observada grandes variações.

Figura 13 - Temperatura e umidade relativa do ar ambiente e do ar intergranular ao longo dos 12 meses de armazenamento dos grãos de milho.



FONTE: Autora.

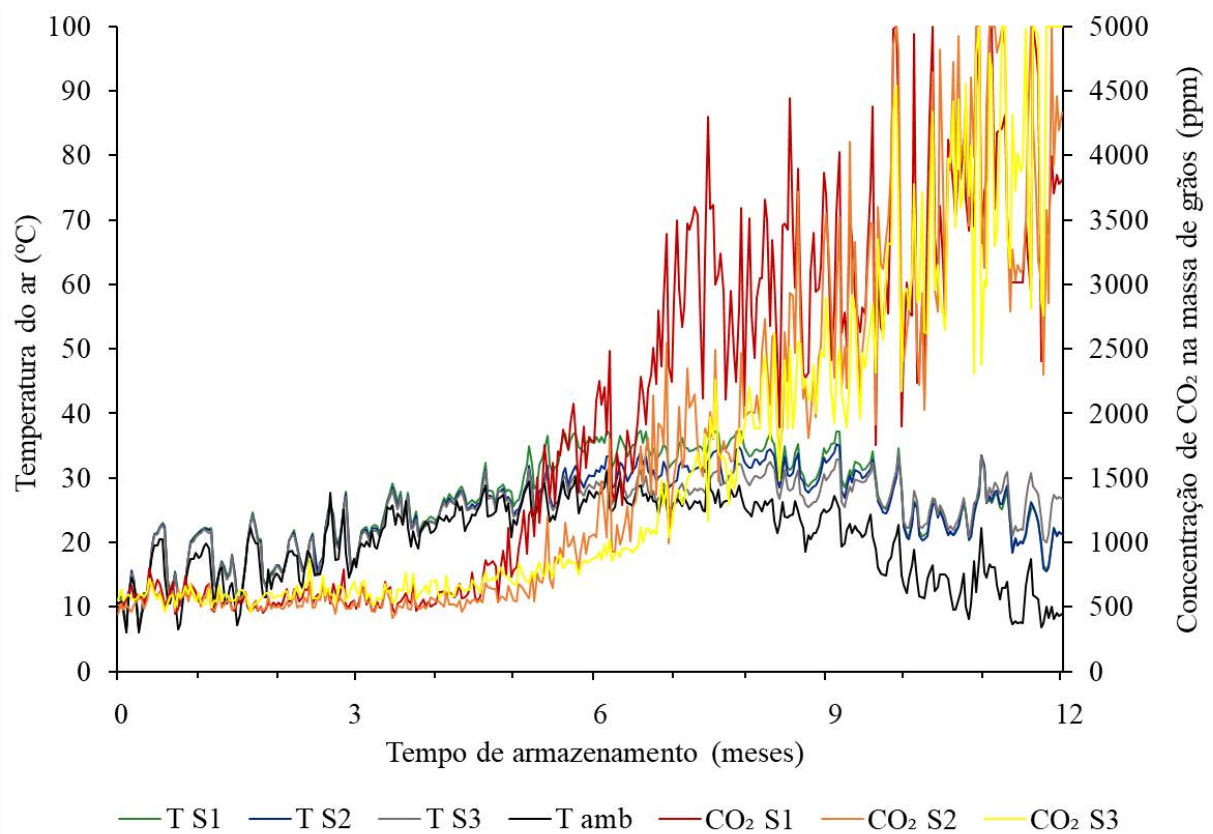
A partir dos cinco meses de armazenamento, observou-se aumento das temperaturas do ar intergranular, em uma relação direta com os tratamentos com maiores teores de água iniciais dos grãos. O teor de água dos grãos é, juntamente com a temperatura, fator primordial na manutenção da qualidade dos grãos armazenados (CHELLADURAI et al., 2016; SILVA et al., 2018; MACIEL et al., 2020).

A concentração de CO₂ advinda do processo respiratório dos grãos e dos microrganismos associados pode ser observada nas Figuras 14 e 15 em função da temperatura e umidade relativa do ar, respectivamente, ao longo dos 12 meses de armazenamento.

A média da temperatura do ar intergranular até os cinco meses de armazenamento foi de 20,8 °C e a concentração de CO₂ da massa de grãos se manteve entre 500 e 600 ppm para todos os tratamentos (Figura 14). Segundo Maier et al. (2010), este valor ainda é considerado

seguro para o armazenamento. O mesmo autor afirma que as concentrações mais altas de CO_2 indicam atividade biológica acima do normal e correlaciona que as concentrações de 600 a 1200 ppm indicam o início da infecção por fungos e de 1500 a 4000 ppm ou mais indicam claramente infecção por fungo grave e/ou infestação de insetos.

Figura 14 - Concentração de CO_2 na massa de grãos em função da temperatura do ar ao longo do armazenamento de grãos de milho.

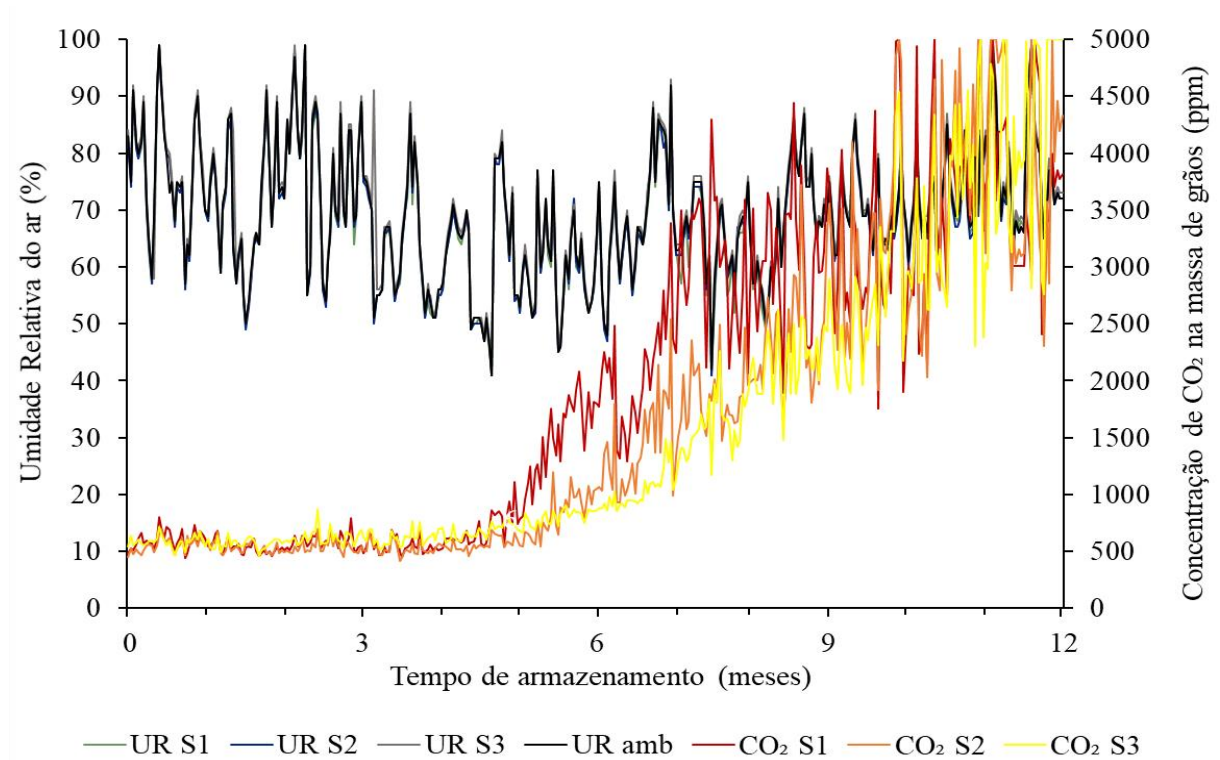


FONTE: Autora.

A partir dos cinco meses de armazenamento, precedendo ao aumento da temperatura intergranular, a concentração de CO_2 começou a aumentar. A média da concentração de CO_2 na massa de grãos ao longo do armazenamento nos tratamentos S1, S2 e S3 foi de 1639, 1029 e 888 ppm, respectivamente. Esses valores indicam que o teor de água inicial dos grãos influenciou na concentração de CO_2 na massa de grãos, sendo maior para os grãos armazenados com 16% de teor de água, seguidos por grãos armazenados com teores de água de 14 e 12%. Raudiene et al. (2017), ao estudarem as taxas de respiração e a concentração de dióxido de carbono no trigo em função de diversas temperaturas e teores de água, constataram que os grãos com teores de água maiores tiveram maior intensidade respiratória, quantificadas pelas concentrações de CO_2 .

O aumento da umidade relativa do ar intergranular a partir da metade do período de armazenamento (Figura 15) coincidiu com o aumento da concentração de CO₂.

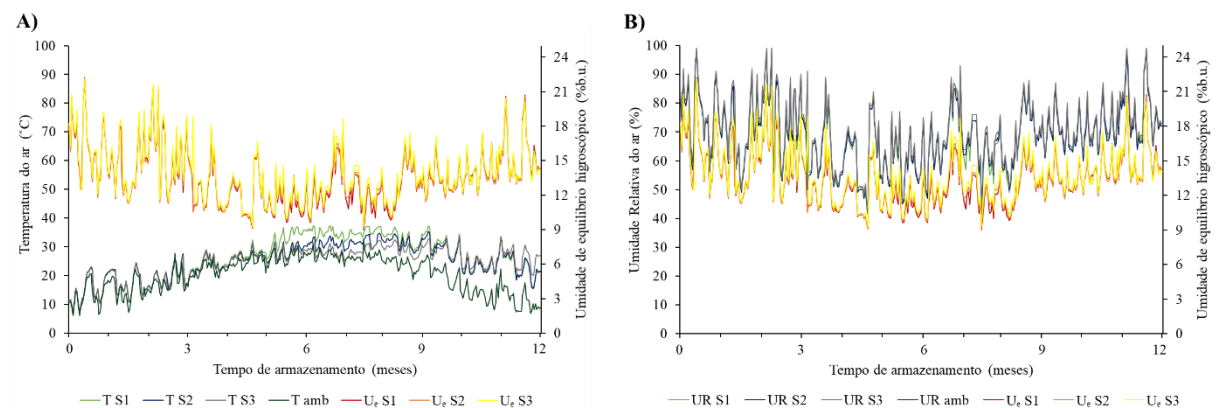
Figura 15 - Concentração de CO₂ na massa de grãos em função da umidade relativa do ar ao longo do armazenamento de grãos de milho.



FONTE: Autora.

A umidade de equilíbrio higroscópico em função da temperatura do ar e da umidade relativa do ar pode ser visualizada na Figura 16.

Figura 16 - Umidade de equilíbrio higroscópico em função da: A) Temperatura do ar e B) Umidade relativa do ar ao longo do tempo de armazenamento dos grãos de milho.



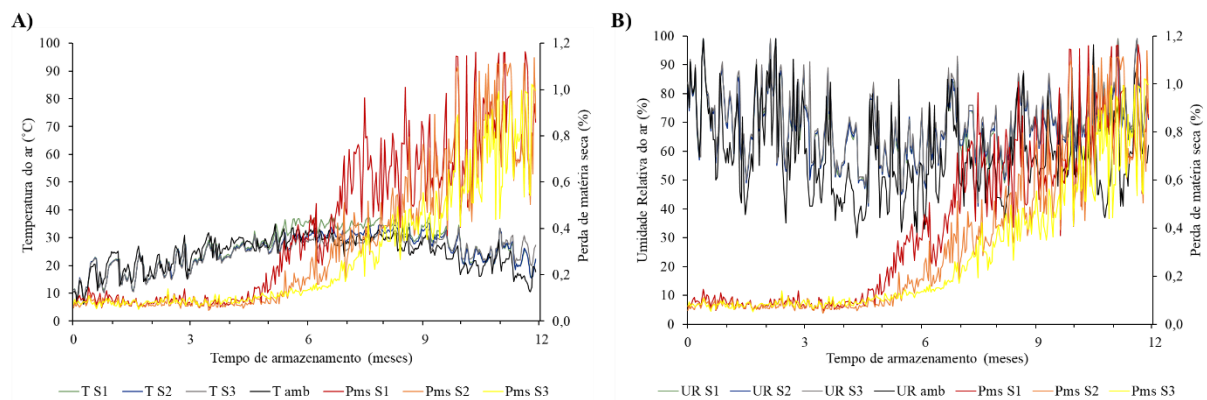
FONTE: Autora.

O teor de água dos grãos, durante o período de armazenamento, varia em função dos grãos tendendo ao equilíbrio higroscópico, mudando de acordo com a umidade relativa e a temperatura do ar, conforme já verificado por outros autores ao estudar grãos de milho (DIONELLO et al., 2000; SCHUH et al., 2011; FERRARI FILHO et al., 2014; TIECKER JUNIOR et al., 2014; LIMA et al., 2016). A partir disso, verifica-se que quanto maior a temperatura intergranular e menor a umidade relativa intergranular, menor o teor de água dos grãos, uma vez que a umidade de equilíbrio higroscópico diminui.

Entre os tratamentos não se observou diferenças significativas na umidade de equilíbrio higroscópico, sendo a média de 12,8% em todos os tratamentos ao longo do armazenamento.

Na Figura 17 é possível observar a perda de matéria seca em função da temperatura umidade relativa do ar. A perda de matéria seca foi maior a partir do quinto mês de armazenamento, concomitantemente ao aumento da temperatura e da umidade relativa do ar intergranular. Em relação ao teor de água, quanto mais elevado, maior foi a perda de matéria seca dos grãos de milho armazenados.

Figura 17 - Perda de matéria seca ao longo do armazenamento em função: (A) Temperatura do ar e B) Umidade relativa do ar ao longo do tempo de armazenamento dos grãos de milho.

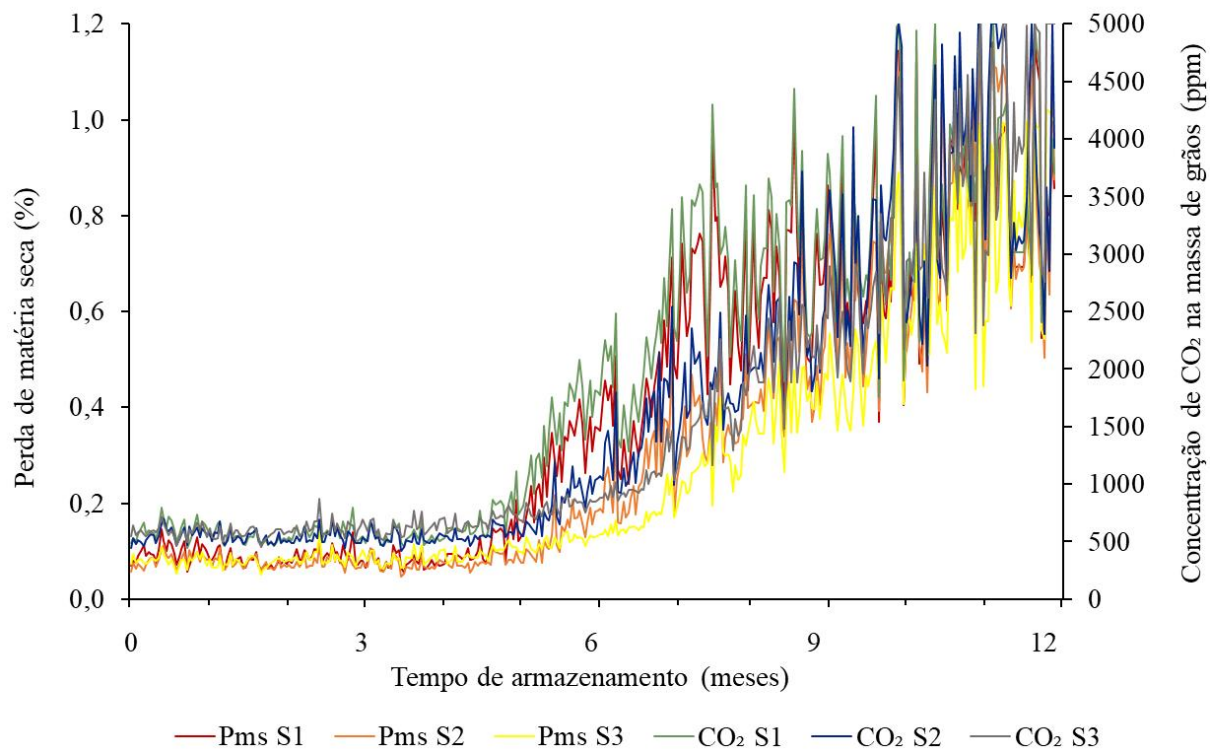


FONTE: Autora.

A perda de matéria seca dos grãos de milho foi proporcional à concentração de CO₂ ao longo do armazenamento (Figura 18).

Os grãos de milho com maiores teores de água apresentam maiores concentrações de CO₂ e conseqüentemente, maior perda de matéria seca durante o período de armazenamento. De acordo com Muir e White (2000), a respiração dos grãos é mais intensa à medida que se têm teores de água elevados, embora a temperatura, a umidade relativa e o estado de conservação também influenciam o metabolismo do grão.

Figura 18 - Concentração de CO₂ na massa de grãos em função da perda de matéria seca ao longo do armazenamento.



FONTE: Autora.

A respiração promove o consumo das substâncias nutritivas do grão, que se traduz em ‘quebra técnica’ do produto armazenado. Conseqüentemente, a perda de matéria seca gera prejuízo aos gestores de unidades armazenadoras no momento da comercialização, uma vez que a valorização do produto agrícola é baseada na sua massa final. Por sua vez, a perda de matéria seca do grão fornece uma estimativa do tempo máximo de armazenamento seguro, definido como o período de tempo durante o qual os grãos podem ser armazenados sem perda significativa na sua qualidade e quantidade (KIBAR, 2015).

De acordo com estudos realizados por Steele et al. (1969), os grãos devem ser armazenados por um período no qual ocorra perda de matéria seca máxima de 0,5%. É possível observar que quanto maior o teor de água dos grãos, menor é o tempo limite no qual o produto pode ser armazenado com segurança, sem perda em sua qualidade e quantidade. O tempo limite para o armazenamento seguro usando a perda máxima de 0,5% de matéria seca é 7, 8 e 9 meses para os tratamentos S1, S2 e S3, respectivamente.

Na Tabela 5, verifica-se o cálculo da diferença de peso dos grãos de milho no enchimento e descarregamento dos protótipos de silos verticais.

Tabela 5 - Cálculo da perda de matéria seca através da diferença de peso dos grãos de milho no enchimento (0 meses) e descarregamento (12 meses) dos protótipos de silos verticais.

Descrição	S1	S2	S3
Peso Inicial (g)	20338	20041	20721
Peso Final (g)	16567	17374	18508
P_{ms} (g) =	3771	2667	2213
P_{ms} (% do Peso Inicial)	18,54	13,31	10,68

FONTE: Autora.

A partir dos dados obtidos, foi realizada a estimativa de perda de matéria seca ao longo do armazenamento, sendo os valores encontrados de 21,4, 17,9 e 15,5 % do peso inicial dos grãos de milho nos tratamentos S1, S2 e S3, respectivamente. Embora com valores mais altos, os resultados estão de acordo com os encontrados através do cálculo da diferença de peso.

5.2 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DOS GRÃOS

5.2.1 Análises físicas

Na Tabela 6 estão apresentados os percentuais de grãos sadios, matérias estranhas e impurezas, quebrados, chochos ou imaturos, fermentados e carunchados, obtidos na classificação dos grãos de milho. Os resultados indicaram que houve interação significativa entre os tratamentos S1, S2 e S3 e os tempos de armazenamento (0, 3, 6, 9 e 12 meses).

De acordo com a Instrução Normativa nº 60 de 2011 (BRASIL, 2011), no total de avariados são contabilizados todos os defeitos, com exceção dos carunchados, que têm seus limites pré-definidos. O maior aumento no percentual de grãos avariados ocorreu a partir do sexto mês de armazenamento (dezembro), período em que o ar ambiente estava com maior temperatura. A formação de grãos ardidos, germinados e carunchados ocorreu pelas reações no interior dos grãos, resultando em formação de pigmentos escuros, exceto para os grãos carunchados, que são originados do ataque de insetos, principalmente do gênero *Sitophilus*.

A porcentagem de grãos mofados é um parâmetro importante para a classificação do milho e depende da integridade dos grãos antes do armazenamento e das condições de armazenamento. O aumento de grãos mofados esteve relacionado com os altos teores de água. Nos meses de inverno, houve um incremento na umidade relativa do ar (Figura 14), que proporcionou um aumento da umidade de equilíbrio higroscópico entre os grãos e o ambiente de armazenamento. Esse aumento pode ter favorecido o aumento de grãos mofados (Tabela 6),

principalmente em grãos quebrados, corroborando com os resultados encontrados por Zambiasi et al. (2020).

Tabela 6 - Classificação de grãos de milho com diferentes teores de água ao longo do armazenamento.

Classificação (%)	Tratamentos	Tempo de armazenamento (meses)				
		0	3	6	9	12
Sadios	S1	92,72aB	91,36bB	91,00cC	68,56dC	8,56eC
	S2	93,96aA	93,80bA	91,72cB	77,24dB	12,99eB
	S3	92,12bC	91,16cC	92,96aA	85,81dA	19,09eA
Matérias estranhas e impurezas	S1	0,12aA	0,12aA	0,12aA	1,12bB	5,92cC
	S2	0,12aA	0,12aA	0,12aA	1,36bC	4,40cB
	S3	0,12aA	0,12aA	0,12aA	0,48bA	2,48cA
Quebrados	S1	6,08dB	6,84eC	5,32cC	4,40bB	4,24aB
	S2	4,48dA	4,44cA	4,92eB	3,60bA	3,28aA
	S3	6,40cC	6,72dB	4,08aA	5,40bC	6,79eC
Chochos ou Imaturos	S1	0,40dC	0,28bC	0,16aA	0,73eC	0,32cA
	S2	0,12aA	0,16bA	0,28cC	0,60eB	0,55dB
	S3	0,16aB	0,20cB	0,20bB	0,36dA	1,13cC
Mofados	S1	1,01bC	0,52aB	1,68cC	4,28dC	10,72eC
	S2	0,32aA	0,40bA	1,28cA	1,96dA	6,69eB
	S3	0,72aB	1,12bC	1,64cB	2,76dB	3,70eA
Fermentados	S1	0,68aB	0,88bB	1,68cC	0,88bB	5,84dC
	S2	1,00aC	1,08cC	1,64dB	1,04bC	2,70eA
	S3	0,48bA	0,52cA	1,00dA	0,16aA	5,59eB
Carunchados	S1	0,00aA	0,00aA	0,4bB	20,76cC	64,4dB
	S2	0,00aA	0,00aA	0,4bB	14,76cB	69,93dC
	S3	0,00aA	0,00aA	0,00aA	5,08bA	62,34cA

FONTE: Autora. *Médias seguidas de letra minúscula na linha e letra maiúscula na coluna não diferem entre si à 1 e 5% de probabilidade. S1 – Grãos armazenados com teor de água de 16%, S2 – Grãos armazenados com teor de água de 14% e S3 – Grãos armazenados com teor de água de 12%.

Diferentes condições de armazenamento de grãos de milho foram estudadas por Paraginski et al. (2015), que observaram um aumento na incidência de grãos mofados em grãos armazenados na temperatura de 25 °C, em comparação com o armazenamento a 5 e 15 °C, estando de acordo com os resultados encontrados no presente trabalho, que quanto maior a temperatura intergranular, maior o percentual de grãos mofados. O aumento da umidade de equilíbrio higroscópico dos grãos com o ambiente de armazenamento aumentou o percentual de grãos mofados, a partir dos 6 meses de armazenamento.

Durante o armazenamento, os grãos de milho foram atacados principalmente por *Sitophilus zeamais*. A porcentagem de grãos danificados por insetos (carunchados) foi intensificada aos 9 meses, acarretando no aumento das matérias estranhas e impurezas (devido a destruição dos grãos pelos insetos) correspondendo ao aumento da temperatura intergranular, sendo os menores percentuais de grãos carunchados observados em grãos armazenados com teor de água de 12%.

O aumento da temperatura favorece a reprodução e o desenvolvimento de insetos. Ferrari Filho et al. (2014), avaliando o efeito de diferentes fontes energéticas na secagem de grãos de milho, também verificaram um aumento de grãos carunchados após o sexto mês de armazenamento, período que coincidiu com uma estação mais quente e que propiciou aumento na população de insetos e, por consequência, aumento deste tipo de defeito.

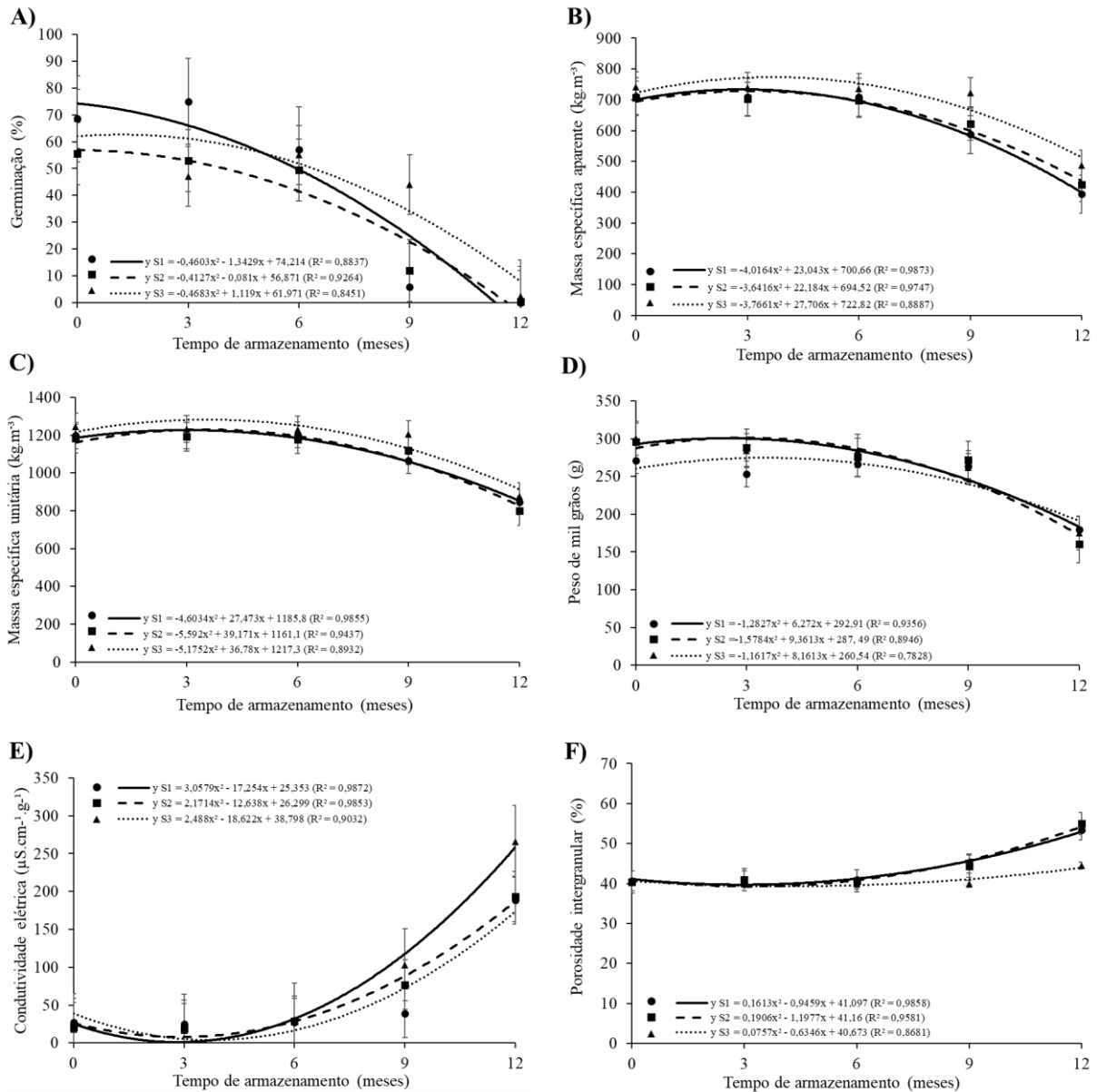
Os resultados da germinação, massa específica aparente, porosidade intergranular, massa específica unitária, peso de mil grãos e condutividade elétrica estão apresentados na Figura 19.

Os resultados indicam que houve redução do percentual de germinação em todos os tratamentos, independente do teor de água e tempo de armazenamento. Essa redução do percentual de germinação dos grãos decorre das alterações que ocorrem na estrutura das membranas dos grãos, sendo que quanto maior a temperatura e teor de água dos grãos, mais significativas são essas alterações são, resultando em perda da qualidade final do produto em curtos períodos de tempo.

As menores reduções do percentual de germinação foram vistas no tratamento S3 (12%), este qual apresentou menor temperatura intergranular durante o armazenamento (Figura 13) e consequentemente manteve por mais tempo o potencial fisiológico. Puzzi (1989) afirma que em temperaturas mais baixas, os grãos podem ser armazenados com maior segurança do que em climas mais quentes.

Os resultados encontrados corroboram com os obtidos por Jaques et al. (2018), em que ao pesquisarem sobre os efeitos da temperatura e teor de água dos grãos de milho nos parâmetros de qualidade tecnológica, constataram que em temperatura de 35°C, a redução da germinação foi mais acentuada em grãos com teor de água de 15 e 18%, chegando a zero aos 135 dias de armazenamento, comparando com grãos armazenados com teor de água de 12%.

Figura 19 - Efeito do tempo de armazenamento e teor de água dos grãos na germinação (A), massa específica aparente (B), massa específica unitária (C), peso de mil grãos (D), condutividade elétrica (E) e porosidade intergranular (F). ● = S1; ■ = S2 e ▲ = S3.



FONTE: Autora.

A massa específica aparente, massa específica real e peso de mil grãos diminuíram ao longo do armazenamento, independente do teor de água dos grãos, corroborando com os resultados de Paraginski et al. (2015). A massa específica aparente diminuiu de 710,5 a 393,94, 706,8 a 424,4 e de 742,1 a 488 kg/m^3 do início aos 12 meses de armazenamento, nos tratamentos S1, S2 e S3, respectivamente. A massa específica real, por sua vez, diminuiu de 1197,7 a 846,4, 1182,2 a 799,1 e 1244,8 a 878,8 kg/m^3 , sendo as menores reduções observadas no tratamento S3 (12%). Essa redução se intensificou aos 6 meses de armazenamento, podendo ser atribuída

ao aumento do processo respiratório dos grãos desencadeado com o aumento da temperatura intergranular.

O peso de mil grãos foi menor no tratamento S3 durante o armazenamento, devido ao menor teor de água inicial dos grãos, entretanto, aos 12 meses se igualou com os demais, evidenciando uma menor redução de peso ao longo do armazenamento.

Os tratamentos com maior redução na massa específica aparente também apresentaram aumento significativo de condutividade elétrica, ou seja, os grãos apresentaram redução da massa específica quando perderam matéria seca e conseqüentemente qualidade devido à deterioração do produto, corroborando com os resultados encontrados por Coradi e Lemes (2018), em estudos com grãos de soja.

O valor de condutividade elétrica aumentou em todos os tratamentos ao longo do armazenamento, indicando deterioração dos grãos, independente do teor de água inicial. Esse aumento foi de 17,6 a 266,1, 20,66 a 193 e 27,4 a 188,6 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ nos tratamentos S1, S2 e S3, respectivamente, evidenciando que o maior teor de água nos grãos e conseqüente maior temperatura intergranular, acarreta em maior ocorrência de alterações, dificultando o armazenamento seguro por longos períodos. O aumento da condutividade elétrica significa uma desorganização das células das membranas celulares dos grãos tornando-os mais suscetível a danos físicos, como temperatura e umidade, permitindo a entrada de patógenos e afetando a qualidade fisiológica.

De acordo com Vasquez et al. (2011); Costa et al. (2010) e Faroni et al. (2005) o teste de condutividade elétrica é capaz de promover uma estratificação de diferentes níveis de vigor de grãos, sendo assim, é possível afirmar que os grãos armazenados com 12% mantêm o vigor por mais tempo que grãos armazenados com 14 e 16%.

Assim como a condutividade elétrica, a porosidade do milho também aumentou com o tempo de armazenamento, independente do teor de água nos grãos. Entre os tratamentos, até os 6 meses de armazenamento, não foram observadas diferenças significativas. A partir desse período, os grãos armazenados com teor de água de 16 e 14% aumentaram de 40% no tempo zero para 53 e 55% aos 12 meses de armazenamento, respectivamente, enquanto que, os grãos armazenados com teor de água de 12% manteve com os mesmos resultados ao longo do armazenamento.

Na Tabela 7 estão os resultados de micotoxinas ($\mu\text{g kg}^{-1}$). A partir dos resultados obtidos foi possível observar diferença significativa nos valores de micotoxinas, entre os tratamentos e o tempo de armazenamento.

No início (tempo 0), a presença de Fumonisina B1 (FB1) e B2 (FB2) foi detectada apenas no tratamento S3. A partir dos 6 meses de armazenamento, o tratamento S1 apresentou os maiores valores de FB1 e FB2, ultrapassando os limites máximos tolerados de micotoxinas em alimentos para comercialização determinados pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 2017), onde para FB1 + FB2 em farinha de milho, creme de milho, fubá, flocos, canjica e canjiquinha o limite máximo de tolerância é de 1500 ($\mu\text{g kg}^{-1}$). Os tratamentos S2 e S3 apresentaram valores de FB1 + FB2 dentro do limite máximo.

Tabela 7 - Micotoxinas encontradas em grãos de milho armazenados com diferentes teores de água ao longo dos doze meses de armazenamento.

Micotoxinas	Tratamentos	Tempo de armazenamento (meses)		
		0	6	12
Fumonisinias B1	S1	0aA	1050bC	3090cC
	S2	0aA	132bA	346cA
	S3	751bB	783cB	353aB
Fumonisinias B2	S1	0aA	510bC	1620cC
	S2	0aA	0aA	221bB
	S3	255bB	507cB	157aA
Tricotecenos DON	S1	0aA	210bB	0aA
	S2	0aA	220bC	321cB
	S3	0aA	0aA	0aA
Ácido Ciclopiazônico	S1	0aA	0aA	22,10bC
	S2	0aA	0aA	12,10bB
	S3	0aA	0aA	0aA
Ergosterol	S1	3080bC	1340aC	13963cB
	S2	860bB	590aB	21594cC
	S3	480bA	233aA	1800cA

FONTE: Autora. *Médias seguidas pela letra minúscula na linha e letra maiúscula na coluna não diferem entre si à 1 e 5% de probabilidade.

Os resultados estão dentro dos níveis encontrados no Sul do Brasil, entre os anos de 2007 à 2012, onde foram relatados níveis de 66 a 7.832 ($\mu\text{g kg}^{-1}$) de FB1 e 110 a 1.201 ($\mu\text{g kg}^{-1}$) de FB2 em milho (SCUSSEL et al., 2014). Segundo Oliveira et al. (2020), a presença de fumonisinias em milho e seus derivados ainda permanece em níveis preocupantes. No Brasil, as Fumonisinias são as micotoxinas mais comumente detectadas em amostras de milho. Isto ocorre porque o fungo *Fusarium verticillioides*, um de seus produtores, é o mais frequente em grãos de milho, sendo encontrado em mais 90% das amostras obtidas em diferentes regiões do país.

Desde a descoberta das FBs em 1988, 28 moléculas foram descritas, sendo a FB1 a mais importante do grupo por ser a mais abundante, mais tóxica entre os isômeros das Fumonisinias. A FB1 e estar associada a leucoencefalomalacia (LEME) em cavalos, edema pulmonar em suínos e hepatocarcinoma em ratos. Em humanos, está associada a câncer esofágico. Com base em evidências toxicológicas, em 1993 a International Agency for Research on Câncer (IARC) classificou a FB1 como provável carcinógeno – Grupo 2B (PRADO, 2017).

O desoxinivalenol (DON), também conhecido como vomitoxina, está intimamente relacionada aos tricotecenos, sendo o fungo *Fusarium sp.* de maior ocorrência (ROCHA et al., 2020). No presente estudo, esta micotoxina foi encontrada aos 6 meses de armazenamento nos tratamentos S1 e S2, com valores de 210 e 220 ($\mu\text{g kg}^{-1}$), respectivamente e aos 12 meses apenas no tratamento S2, com valor de 321 ($\mu\text{g kg}^{-1}$), estando dentro do limite permissível de 750 ($\mu\text{g kg}^{-1}$) para farinha de trigo, massas, crackers, biscoitos de água e sal, e produtos de panificação, cereais e produtos de cereais exceto trigo e incluindo cevada malteada (ANVISA, 2017).

Os fungos *Fusarium culmorum* e *Fusarium graminearum*, são os principais responsáveis pela produção de DON (JI et al., 2018). Os estudos mostram que, em nível molecular, ele se liga ao ribossomo e inibe a síntese de proteínas e, portanto, interrompe a função celular normal. Mesmo as baixas doses de DON exercem efeitos tóxicos, incluindo disfunção imunológica e diminuição do crescimento. No entanto, a exposição à dose letal pode causar leucocitose, hemorragia, diarreia, endotoxemia e morte semelhante ao choque (PESTKA, 2010).

O fungo *Aspergillus sp.* produz aflatoxinas (AFLA) e ácido ciclopiazônico, (CPA) sendo estas as micotoxinas mais danosas aos seres humanos e animais, devido sua elevada toxicidade e ampla ocorrência, contendo propriedades carcinogênicas, mutagênicas, teratogênicas e imunossupressoras (FERREIRA et al., 2014). A presença de ACP foi observada apenas aos 12 meses de armazenamento nos tratamentos S1 e S2, com concentrações de 22,10 e 12,10 ($\mu\text{g kg}^{-1}$), respectivamente.

A presença de ergosterol foi observada desde o início do armazenamento, em concentrações de 233 a 21594 ($\mu\text{g kg}^{-1}$), sendo os maiores valores encontrados no tratamento S1 aos 0 e 6 meses, e no tratamento S2 aos 12 meses de armazenamento. O ergosterol é o mais importante esterol constituinte natural das células ou membranas miceliais da grande maioria dos fungos. Os maiores níveis são encontrados nas camadas fosfolipídicas da membrana fúngica onde desempenha importante função estrutural e hormonal na progressão do ciclo celular. A concentração do ergosterol numa massa fúngica é dependente do estágio de desenvolvimento, e em consequência da umidade, temperatura e tempo de crescimento.

A correlação entre concentração de ergosterol e unidades formadoras de colônias fúngicas é alta ($R^2 = 0,94$), indicando boa equivalência entre as técnicas para a avaliação do grau de contaminação fúngica do milho (PEREIRA et al., 2008). Sendo assim, a partir dos resultados encontrados, é possível afirmar que o tratamento S3, por apresentar as menores concentrações de ergosterol ao longo do armazenamento, possui menor contaminação fúngica que os demais tratamentos.

Os resultados não foram lineares, o que comprova que as análises de micotoxinas são muito dependentes de amostragem, e a reprodutibilidade dos resultados é difícil (DILKIN et al., 2000). As micotoxinas quando ingeridas por seres humanos ou animais, podem produzir diversos efeitos deletérios a saúde, sobretudo pelas suas propriedades carcinogênicas, teratogênicas, estrogênicas, anabolizantes, mutagênicas e hemorrágicas (KUMAR et al., 2008). Animais, principalmente frangos e suínos, ao consumirem rações elaboradas com milho contaminado com micotoxinas, diminuem seu rendimento de crescimento e seu desenvolvimento reprodutivo, comprometendo toda a qualidade do lote ao final do ciclo produtivo. A presença de Aflatoxinas B1, B2, G1 e G2, DAS, 3-AcDON, 15-AcDON, Toxina T-2, Toxina HT-2, Nivalenol, Fusarenol-X, Ocratoxina A, Zearalenona, não foram identificadas nos grãos de milho ao longo do armazenamento.

5.2.2 Análises físico-químicas

Na Figura 20 estão apresentados os resultados da composição centesimal dos grãos de milho armazenados com diferentes teores de água por 12 meses.

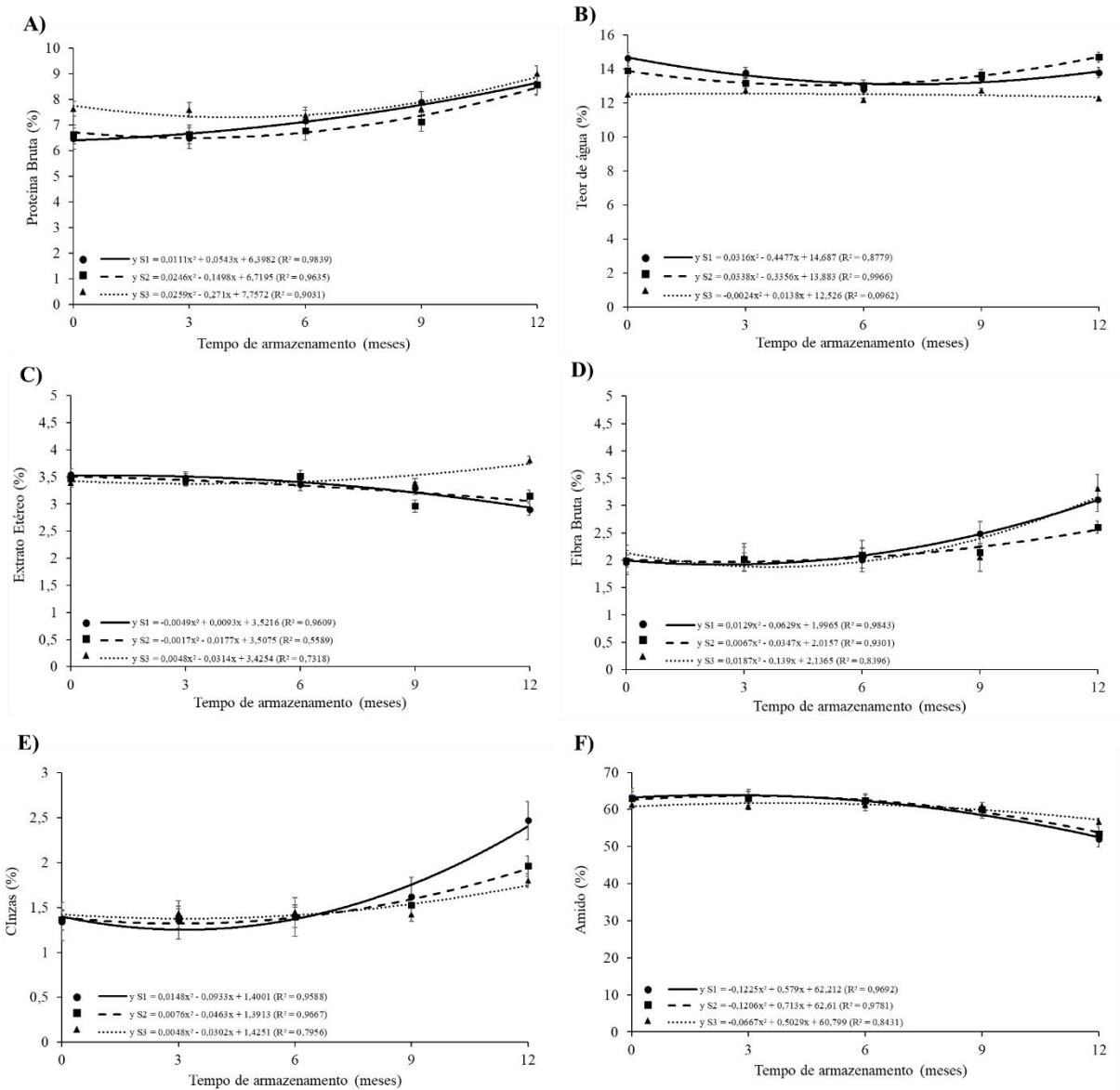
Os resultados mostraram que a média dos teores de água, ao longo do armazenamento, foi de 13,8, 13,7 e 12,5% para os tratamentos S1, S2 e S3, respectivamente. Produtos de milho armazenados com teor de água superior a 13,0% apresentam maiores alterações na qualidade do produto final, tais como aspecto, sabor, odor, além de reduções nutricionais e diminuição da vida de prateleira (ALMEIDA et al., 2017).

O percentual de proteína bruta aumentou ao longo do armazenamento, em todos os tratamentos analisados, com intensificação a partir dos 9 meses, concomitante ao aumento dos grãos carunchados. Esse aumento ocorreu possivelmente pois, na amostra, foi determinado junto à proteína dos grãos, a proteína dos insetos, aumento assim a porcentagem.

O extrato etéreo não apresentou diferença significativa entre os tratamentos e o tempo de armazenamento até os 6 meses. A partir desse período, o tratamento S3 permaneceu constante até o fim do armazenamento, com média de 3,4%, enquanto que os tratamentos S1 e

S2 apresentaram diminuição significativa de 3,54 para 3,11 e 3,47 para 3,15%, respectivamente. Entretanto, na prática, estes valores não se diferenciam. O teor de fibra bruta não variou entre os tratamentos, somente ao final do tempo de armazenamento nos tratamentos S1 e S3. O valor médio encontrado ao longo do armazenamento foi de 2,05%.

Figura 20 - Composição centesimal (%) dos grãos de milho armazenados por 12 meses com teor de água de 12, 14 e 16 % (b.u.). ● = S1; ■ = S2 e ▲ = S3.



FONTE: Autora.

Em relação ao teor de cinzas, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos e o tempo de armazenamento, exceto aos 12 meses para o tratamento S1, sendo 1,4% o valor médio encontrado, corroborando com Schuh et al (2011), que obteve média de 1,38%. Embora, não houve diferença significativa entre os tratamentos, verificou-se um

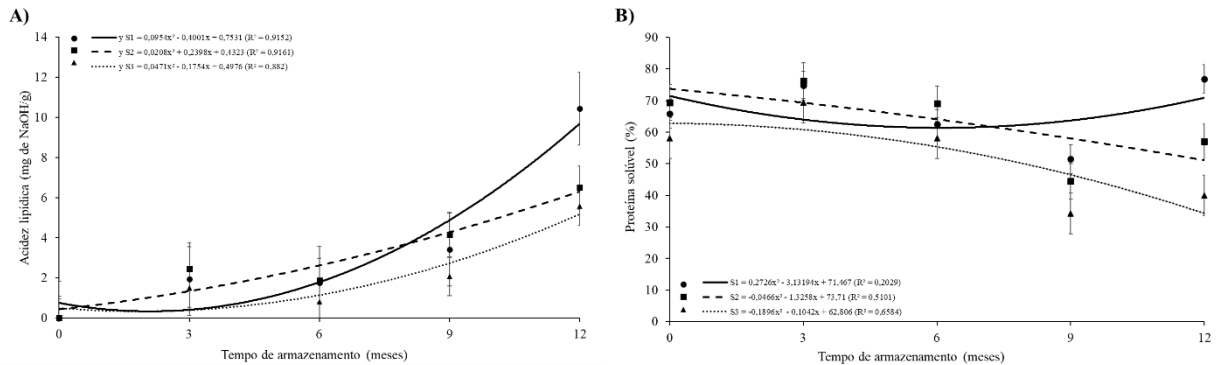
aumento do teor de cinzas durante o tempo de armazenamento, sendo o mesmo aumento verificado por Elias et al. (2009) e Tiecker Junior et al. (2014). As atividades metabólicas dos grãos e dos microrganismos associados consomem a matéria orgânica, metabolizando-a em CO₂, água e outros produtos, com liberação de calor, podendo transformar estruturalmente a composição mineral sem alterar o seu conteúdo total, sendo a deterioração acelerada em cereais com teores de água superiores a 13-14% (JUNIOR et al., 2014). Desta forma, o teor de cinzas assume valores proporcionalmente maiores à medida que parte da matéria orgânica é consumida. Aos 12 meses, o teor de água dos grãos influenciou significativamente a quantidade de cinza das amostras. O tratamento S1 apresentou 2,47% de cinzas, seguido dos tratamentos S2 e S1, com teor de 1,96 e 1,8%, respectivamente. Sendo assim, verifica-se que houve redução da qualidade de grãos de milho ao longo do armazenamento, principalmente no tratamento S3, devido a redução do teor de compostos orgânicos.

O grão de milho é um alimento essencialmente energético, sendo composto por aproximadamente 70% de amido. Os resultados obtidos mostram que o rendimento do amido variou de 51,96 a 63,59%, corroborando com resultados encontrados por Malumba et al., (2009), que encontraram variação de 64,4 % a 43,3. O rendimento do amido não sofreu alterações significativas entre os diferentes teores de água. Em relação ao tempo de armazenamento, este apresentou redução a partir dos 9 meses para grãos armazenados com teores de água de 14 e 16% (b.u.).

A acidez lipídica e proteína solúvel de milho armazenado com diferentes teores de água por 12 meses são apresentadas na Figura 21.

Observou-se diminuição no índice de acidez aos seis meses de armazenamento, independente do tratamento, estando de acordo com os resultados encontrados por Coradi et al. (2015b) e Coradi et al. (2014), os quais afirmaram que, em grãos não danificados, armazenados a temperatura ambiente e teor de água abaixo de 12%, ocorrem pequenas variações nos níveis de acidez dos grãos, o que pode explicar os resultados encontrados neste trabalho. A partir dos seis meses de armazenamento, a acidez lipídica, como resultado da hidrólise dos triacilglicerídeos. Conforme descrito por Genkawa et al. (2008) e Park et al. (2012) para o arroz, a acidez lipídica também é utilizada como índice de deterioração da qualidade durante o armazenamento do milho, uma vez que a lipólise ocorre mais rapidamente do que a quebra da proteína e do amido. O incremento de acidez observado no óleo de grãos de milho corrobora com os resultados obtidos por Dionello et al. (2000) e por Elias et al. (2016), com grãos de milho e de feijão, respectivamente, armazenados em ambiente natural, em que observaram incremento da acidez do óleo ao longo do período de armazenamento.

Figura 21 - Acidez lipídica e proteína solúvel de milho armazenado com diferentes teores de água durante 12 meses. ● = S1; ■ = S2 e ▲ = S3.



FONTE: Autora.

O aumento da acidez está diretamente correlacionado com a velocidade e a intensidade do processo deteriorativo dos grãos. A avaliação desse índice constitui-se em eficiente parâmetro para o controle da conservabilidade de grãos durante o armazenamento. O maior aumento da acidez lipídica ao final de 12 meses de armazenamento foi observado no milho armazenado com teor de água de 16%, seguido dos grãos armazenados com 14 e 12%, respectivamente. O baixo teor de água dos grãos pode ter minimizado a hidrólise e oxidação dos lipídios, proporcionando um menor valor de acidez lipídica, corroborando com os resultados obtidos por Rani et al. (2013), que relataram correlação positiva entre o teor de água, temperatura de armazenamento e o tempo de armazenamento do feijão ninho com a acidez lipídica das sementes armazenadas.

Logo, o incremento de acidez observado indica que ocorreu degradação dos grãos ao longo do período de armazenagem para os três tratamentos, entretanto, com maior intensidade no tratamento S1. O teor de acidez informa o estado de conservação do óleo, quantifica as substâncias ácidas presentes e é um indicador de qualidade, ou seja, quanto menores os índices de acidez melhor é a qualidade do óleo (BORÉM et al., 2014).

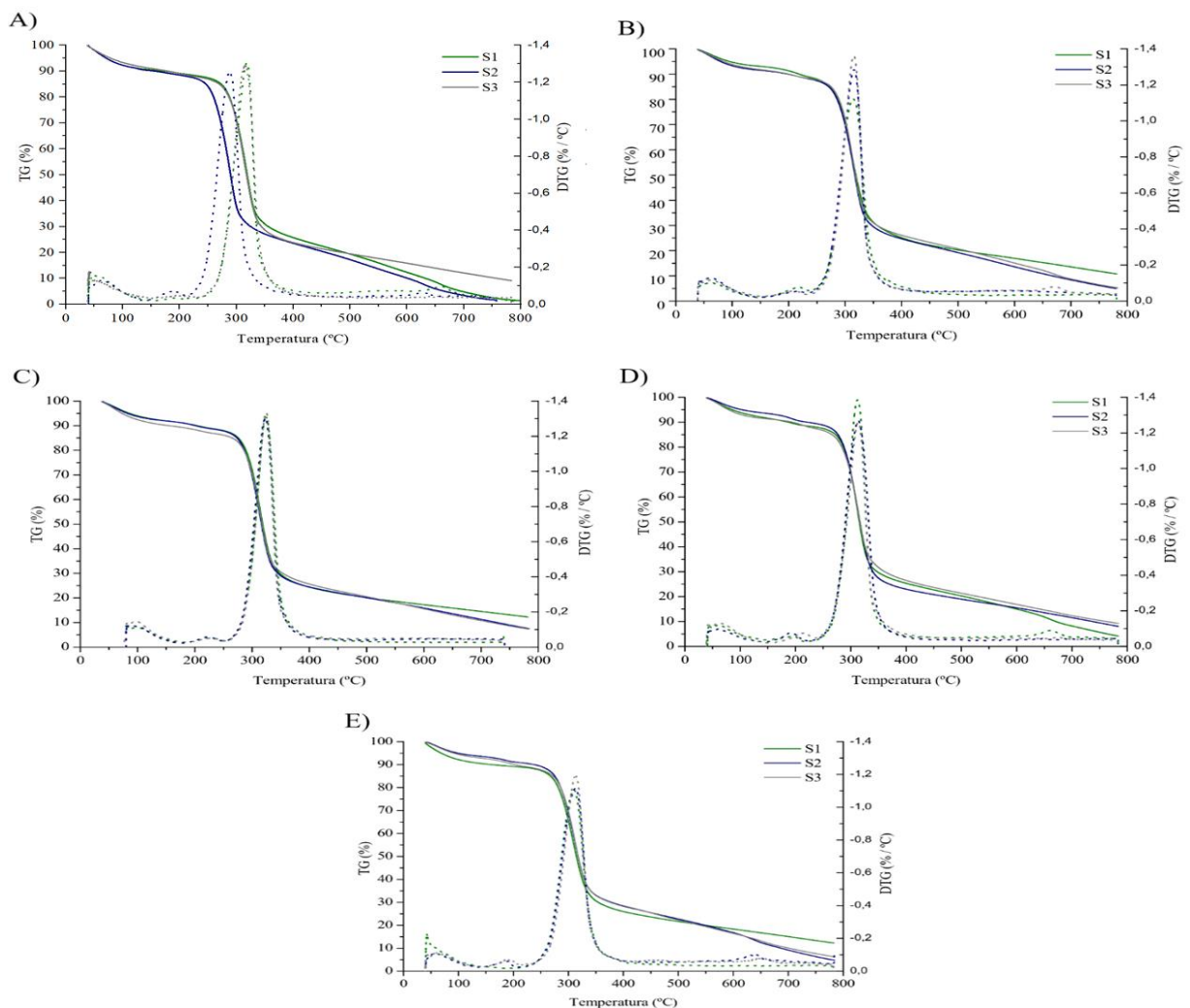
O milho armazenado por até 6 meses com teor de água de 16, 14 e 12% apresentou valores de solubilidade proteica semelhantes entre si. A partir dos 6 meses, com exceção do milho armazenado com 16% de água, a solubilidade proteica foi drasticamente reduzida.

Ao final dos 12 meses de estudo, o milho armazenado com teor de água de 16, 14 e 12% apresentou solubilidade de 76,52, 57,03 e 39,91, respectivamente. A diminuição da solubilidade proteica dos grãos durante o armazenamento foi verificada por Sirisoontarak e Noomhorm (2007) para o arroz, sendo atribuído como um dos fatores que afetam as mudanças nas propriedades da pasta. Durante o armazenamento, as proteínas podem interagir com o amido, o que leva a uma estrutura mais estável e insolúvel das proteínas.

De acordo com Teo et al. (2000), um pequeno aumento nas ligações dissulfeto na estrutura da proteína do arroz durante o armazenamento pode reduzir a solubilidade da proteína e interferir nas características de gelatinização da farinha de arroz. Assim, o aumento das ligações dissulfeto dentro da estrutura da proteína do milho também pode ser responsável pela diminuição determinada na solubilidade da proteína do milho durante o período de armazenamento de 12 meses nos diferentes tratamentos do estudo.

As curvas de perda de massa (TG) e da primeira derivada (DTG) dos grãos de milho com diferentes teores de água ao longo do armazenamento foram apresentadas na Figura 22. Observou-se, em geral, quatro eventos de perda de massa nas amostras de milho ao longo do armazenamento.

Figura 22 - Análise termogravimétrica (TG e DTG) de grãos de milho armazenados com diferentes teores de água: (A) 0 meses; (B) 3 meses; (C) 6 meses; (D) 9 meses e (E) 12 meses. A TG é representada pela linha contínua e DTG pela linha pontilhada.



FONTE: Autora.

O primeiro evento da TG ocorreu entre 40 e 150 °C, exceto no tratamento S2 no início do armazenamento. Esse primeiro evento corresponde à perda de cerca de 8,15% da massa da amostra de milho, estando relacionada, segundo Yao et al. (2020), a evaporação da água constituinte do grão, incluindo água livre, água absorvida e água cristalina. O segundo evento (150-235°C), de menor intensidade, refere-se à evaporação da água remanescente no grão, representando a perda média de 3,4% de massa em todos os tratamentos, exceto para o tratamento S1 no início do armazenamento (0 meses) e aos 12 meses.

No terceiro evento (ou segundo evento para o tratamento S1 no início (0 meses) e as 12 meses de armazenamento), observado em média entre 235 e 450°C, ocorreu a reação de pirólise da amostra de milho, representando a maior perda de massa de cerca de 77%. A temperatura de pico foi em média 315°C, corroborando com os resultados encontrados por Yao et al. (2020) para a mesma taxa de aquecimento (20°C/min).

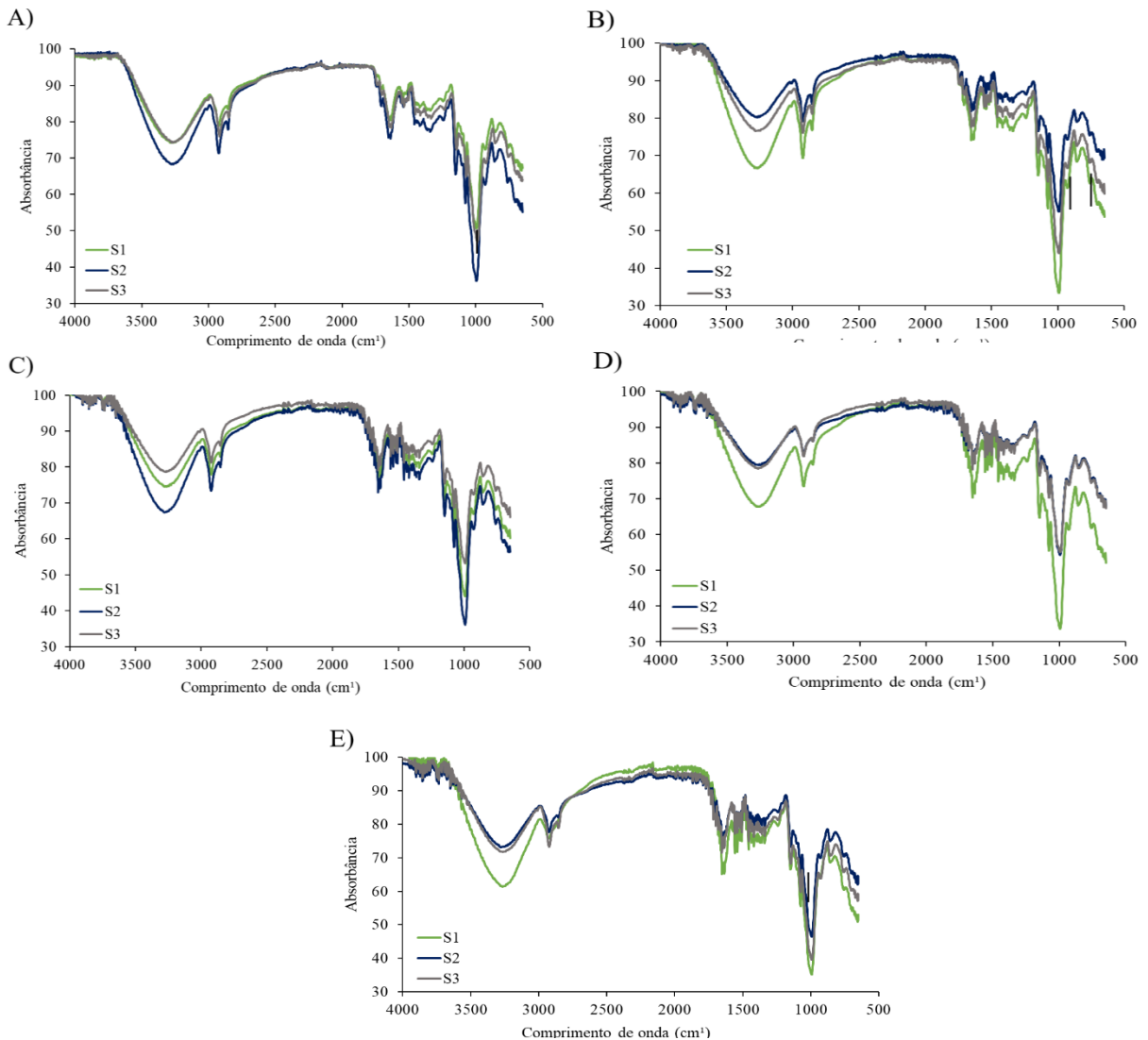
A quarta etapa, presente apenas nos tratamentos S2 no início do armazenamento, S3 aos 3 meses, S1 aos 9 meses e S2 e S3 aos 12 meses, refere-se à perda de massa proveniente do processo de degradação térmica dos resíduos em cinzas.

Os espectros FTIR de milho mostraram perfis semelhantes ao decorrer do armazenamento, entretanto, conforme apresentado na Figura 23 é possível verificar que o teor de água influencia a intensidade de absorção, uma vez que esta é proporcional à concentração dos componentes. No início (0 meses) e aos 6 meses de armazenamento, o tratamento S2 apresentou maior intensidade de absorção, enquanto isso, aos 3, 9 e 12 meses de armazenamento, o tratamento S1 apresentou maior intensidade de absorção que os demais tratamentos.

Como em qualquer outro alimento os espectros de infravermelho evidenciam que a amostra de milho é uma mistura bastante complexa, pois contém informações de vários grupos funcionais e muitos deles se sobrepõem tornando difícil a atribuição de um determinado pico exclusivamente a uma única função química.

Várias absorvências discerníveis são encontradas na região da impressão digital em 930, 993, 1077 e 1148cm⁻¹, que representavam o alongamento da ligação C-O (FANG et al., 2002). A faixa do infravermelho médio representa o conteúdo de água no produto, os picos de água foram observados em 1653cm⁻¹ e um amplo espectro variou de 3.000 a 3.700, também atribuído ao teor de umidade, corroborando com os resultados encontrados por Yaqoob et al. (2019). Os espectros de absorção são baseados nos grupos funcionais H e OH, e o amplo espectro também pode ser atribuído à vibração dos grupos OH.

Figura 23 - Espectros de milho armazenado com teores de água de 16, 14 e 12% ao longo do armazenamento: A) 0 meses; B) 3 meses; (C) 6 meses; (D) 9 meses e (E) 12 meses.



FONTE: Autora.

A banda entre 1570 e 1680 reflete a presença de proteína na amostra que pode ser quantificada por meio do grupo amida I e amida II. A amida I representa o C=O do grupo peptídico enquanto a amida II representa principalmente a curvatura NH e em segundo lugar o trecho CN. A forte absorbância em 1560 atribuída à curvatura da amida II e NH, enquanto 1540 representa a amida I, mostrou que a farinha é rica em proteínas (MANLEY et al., 2002). Os espectros de absorção variaram de 1560 a 1700 e 1540 a 1580 representa a ligação C-H e creditada à quantidade de gordura na amostra. Picos fortes foram encontrados na mesma região resultante devido à gordura presente na amostra de farinha.

O amido é o principal constituinte da farinha de milho, enquanto os principais componentes do amido são a amilose e a amilopectina. Os picos abaixo de 800, região da impressão digital e amplo espectro de 3000 a 3700 (OH) representam o amido (REYES et al., 2016; GAO et al., 2014; AMIR et al., 2013).

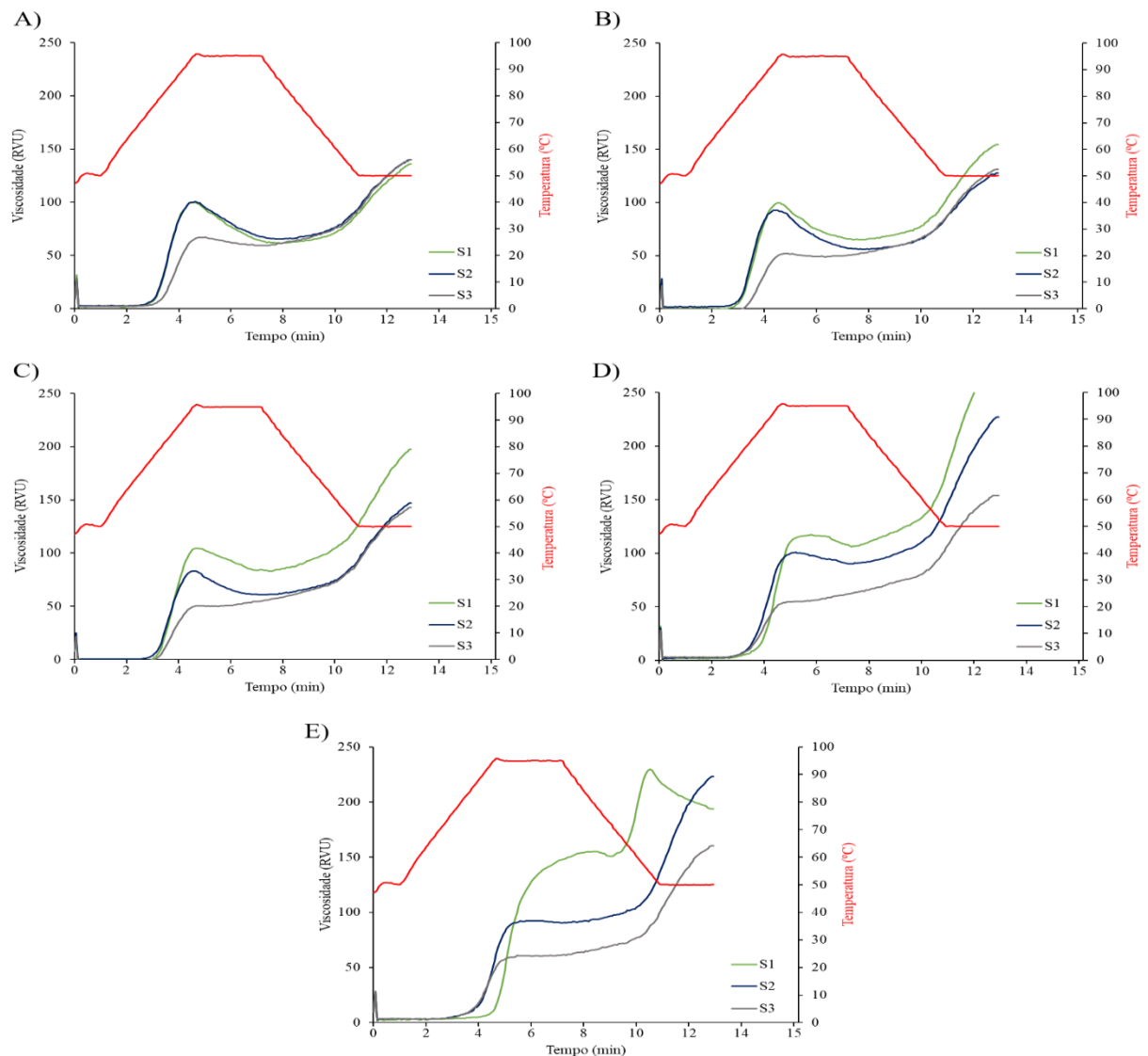
Nas Figuras 24 e 25 são apresentados, respectivamente, os gráficos e os parâmetros viscoamilográficos da amostra de grãos de milho ao longo do armazenamento. De acordo com Perdon et al., (1997) os parâmetros viscoamilográficos indicam o comportamento dos grãos durante o processamento.

De acordo com Sandhu e Singh (2007) a temperatura de pasta é a temperatura em que a viscosidade do amido começa a aumentar na análise de RVA. Os resultados indicam que no início do armazenamento (0 meses), a temperatura de pasta foi 75,8, 75,4 e 79,1°C nos tratamentos S1, S2 e S3, com aumento de 18,3, 10,1 e 4,9°C, respectivamente, após 12 meses de armazenamento. O aumento da temperatura de pasta é resultado do fortalecimento das interações moleculares e da reticulação do amido (ZAVAREZE; DIAS, 2011), sendo assim, os resultados obtidos indicam que quanto maior o tempo de armazenamento e maior o teor de água dos grãos, maior será a energia necessária para o rompimento dessas interações.

O pico de viscosidade é alcançado quando há maior quantidade de grânulos inchados no sistema. A partir dos dados de pico de viscosidade, observa-se que quanto maior o teor de água dos grãos, maior o pico de viscosidade, independente do tempo de armazenamento, tendo como média 104,6, 92,6 e 60,6 RVU nos tratamentos S1, S2 e S3, respectivamente. Em relação ao tempo de armazenamento, o tratamento S1 apresentou aumento significativo a partir dos 9 meses, enquanto os tratamentos S2 e S3 diminuíram entre o terceiro e sexto mês, voltando aos valores iniciais aos 9 meses. Em relação ao horário de pico, até os 3 meses de armazenamento, o teor de água e tempo de armazenamento não influenciaram nos resultados. A partir desse período, o tempo necessário para alcançar o pico aumentou significativamente em todos os tratamentos, embora diminuído aos 12 meses no tratamento S3.

A quebra de viscosidade diminuiu com o aumento do tempo de armazenamento em todos os tratamentos, diminuindo de 38,7 a 8,7, 34,54 a 2,295 e 7,95 a 1,455 RVU do início do armazenamento (tempo 0) até o final (tempo 12), para os tratamentos S1, S2 e S3, respectivamente. A redução da viscosidade de quebra pode ser atribuída a uma interação entre as cadeias de amilose com os demais constituintes dos grãos durante o aquecimento, principalmente com proteínas e lipídios, que dificultam a gelatinização total do amido.

Figura 24 - Curvas viscoamilográficas das amostras de milho armazenados com diferentes teores de água ao longo do armazenamento: A) 0 meses; B) 3 meses; C) 6 meses; D) 9 meses e E) 12 meses.



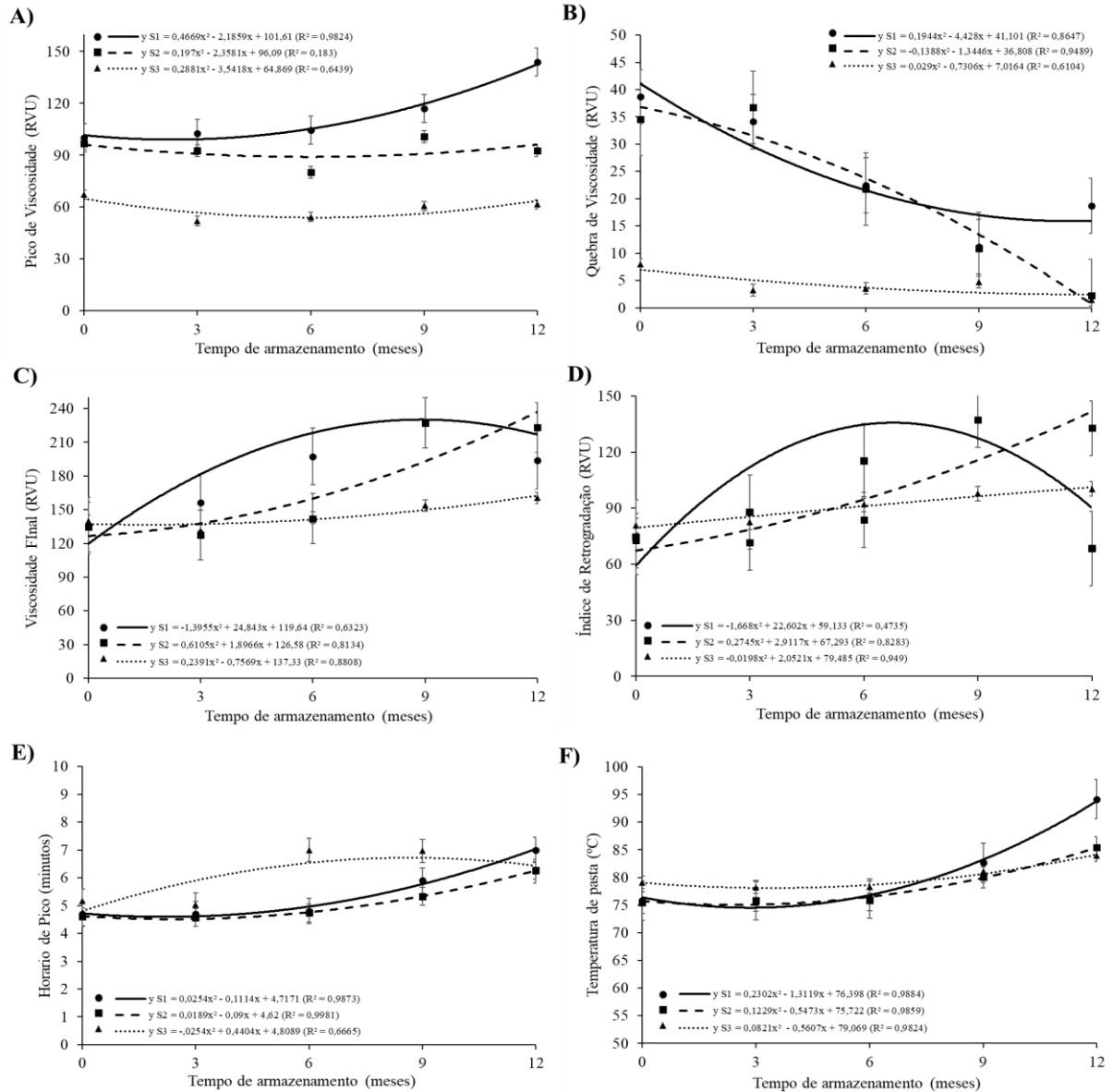
FONTE: Autora.

De acordo com Zhou et al. (2003), a redução no valor de quebra de viscosidade é o índice que melhor explica as alterações entre os constituintes dos grãos, valores que indicam uma menor capacidade de rompimento dos grânulos de amido, resultado da complexação da amilose, estrutura linear da molécula do amido, com outros constituintes dos grãos, principalmente com proteínas, fortalecendo essas interações e consequentemente, aumentando a estabilidade dos grânulos durante o aquecimento.

A viscosidade final aumentou para todos os tratamentos ao longo do armazenamento, entretanto, no tratamento S1 apresentou diminuição no final do armazenamento. A maior

viscosidade final reflete uma maior tendência à retrogradação após o resfriamento, devido a recristalização das moléculas de amilose lixiviadas (FALADE; CHRISTOPHER, 2015).

Figura 25 - Parâmetros viscoamilográficos da amostra de milho armazenado por 12 meses com diferentes teores de água. ● = S1; ■ = S2 e ▲ = S3.



FONTE: Autora.

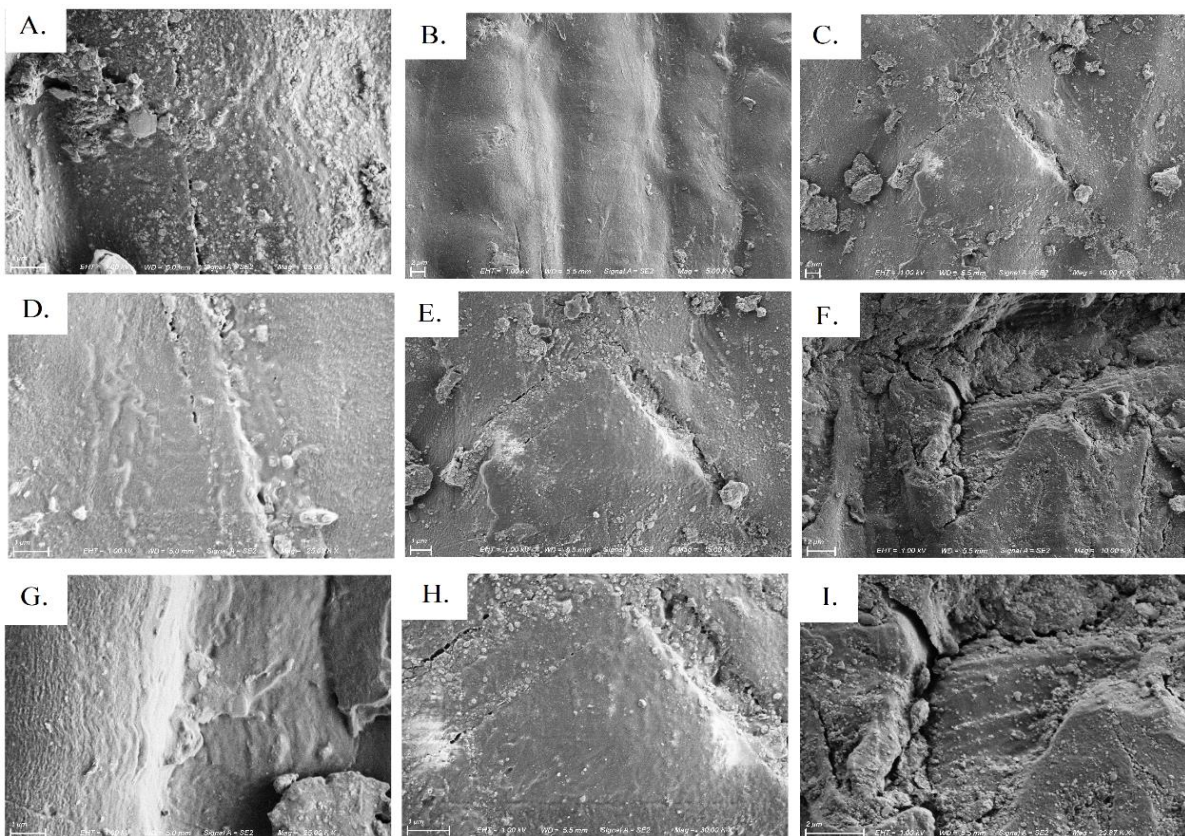
O índice de retrogradação aumentou em todos os tratamentos ao longo do armazenamento, entretanto, assim como a viscosidade final, o tratamento S1 apresentou diminuição aos 12 meses de armazenamento. A retrogradação é um processo no qual as moléculas do polímero de amido se associam. O resultado final de tais associações pode ser a insolubilidade (precipitação) ou um gel mais firme, que muitas vezes é opaco por causa dos

crystalitos insolúveis. A retrogradação em uma pasta quente ou gel de um sistema de amido cozido é frequentemente indesejável (BEMILLER, 2019).

5.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Na Figura 26 são apresentadas as características morfológicas, determinadas com microscopia eletrônica de varredura dos grãos de milho armazenados com diferentes teores de água. Os resultados indicam que ocorrem alterações na morfologia ao final de 12 meses de armazenamento em todos os tratamentos estudados.

Figura 26 - Micrografias obtidas através da microscopia eletrônica de varredura dos grãos de milho armazenados com diferentes teores de água: (A) 12% – tempo zero, (B) 12% – seis meses, (C) 12% – doze meses, (D) 14% – tempo zero, (E) 14% – seis meses, (F) 14% – doze meses, (G) 16% – tempo zero, (H) 16% – seis meses, (I) 16% – doze meses.



FONTE: Autora.

A partir das micrografias é possível confirmar os resultados das análises físicas e físico químicas quanto à deterioração dos grãos ao longo do armazenamento. Independente do tratamento, a deterioração dos grãos é visível com o aumento do tempo de armazenamento. Os

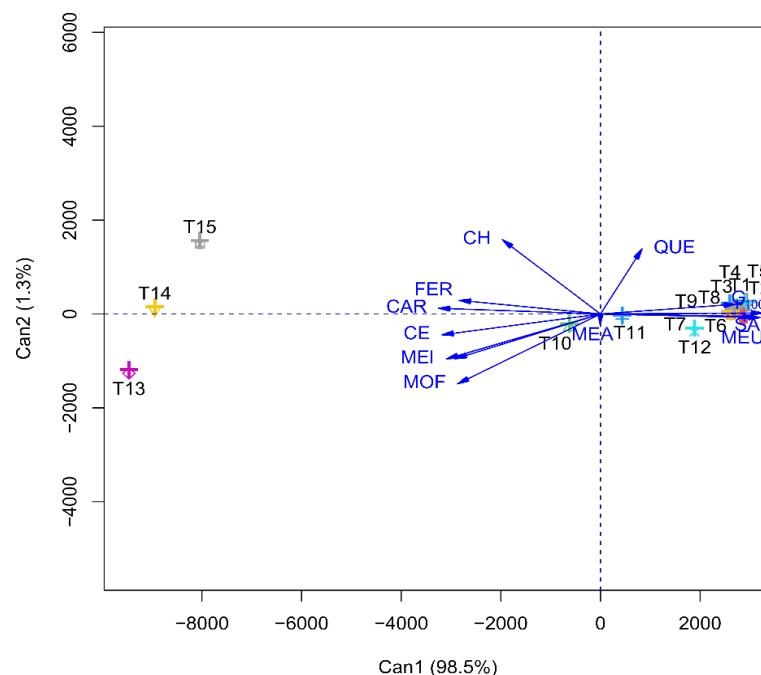
grãos com teor de água de 12% visivelmente conservam por mais tempo a qualidade dos grãos, uma vez que mesmo aos 12 meses de armazenamento (Figura 26 C), apresentam menor deterioração que os grãos armazenados com 16 e 14% de água aos 6 meses (Figura 26 E; Figura 26 H) de armazenamento.

5.2.4 Análises multivariadas

A análise das variáveis canônicas coletadas no biplot mostrou 99,8% (Figura 27), 89,5% (Figura 28) e 100% (Figura 29) da variação total entre os tratamentos para as variáveis físicas, físico-químicas e demais variáveis avaliadas no experimento, respectivamente. Este resultado demonstra alta credibilidade na interpretação dos resultados a seguir. Assim, os tratamentos próximos entre si possuem alta similaridade. Os vetores (setas) apontam para as variáveis que mais influenciaram na similaridade dos tratamentos específicos.

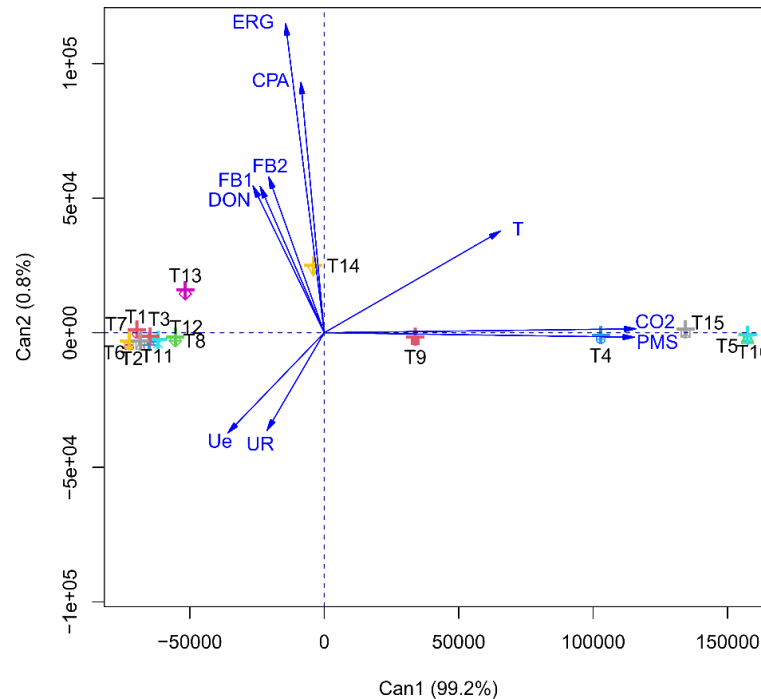
Para as variáveis físicas (Figura 27), os tratamentos T13, T14 e T15 (grãos com teor de água de 16, 14 e 12% aos 12 meses de armazenamento) foram associados às variáveis CH, FER, CAR, CE, MEI e MOF, indicando elevada deterioração.

Figura 27 - Variáveis canônicas para variáveis físicas avaliadas no experimento. CH = Grãos Chochos e Imaturos; FER = Grãos Fermentados; CAR = Grãos Carunchados; CE = Condutividade Elétrica; MEI = Matérias Estranhas e Impurezas; MOF = Grãos Mofados; QUE = Grãos Quebrados; MEU = Massa Específica Unitária; MEA = Massa Específica Aparente; SAD = Grãos Sadios; P1000 = Peso de mil grãos e G = Germinação. Carunchados; CE = Condutividade Elétrica; MEI = Matérias Estranhas e Impurezas; MOF = Grãos Mofados; QUE = Grãos Quebrados.



FONTE: Autora.

Figura 29 - Variáveis canônicas para outras variáveis avaliadas no experimento. T = Temperatura; CO₂ = Concentração de Dióxido de Carbono; PMS = Perda de Matéria Seca; UR = Umidade Relativa do ar; U_e = Umidade de equilíbrio higroscópico; DON = Tricotecenos DON; FB1 = Fumonisina B1; FB2 = Fumonisina B2; CPA = Ácido Ciclopiazônico; P = Porosidade Intergranular e ERG = Ergosterol.



FONTE: Autora.

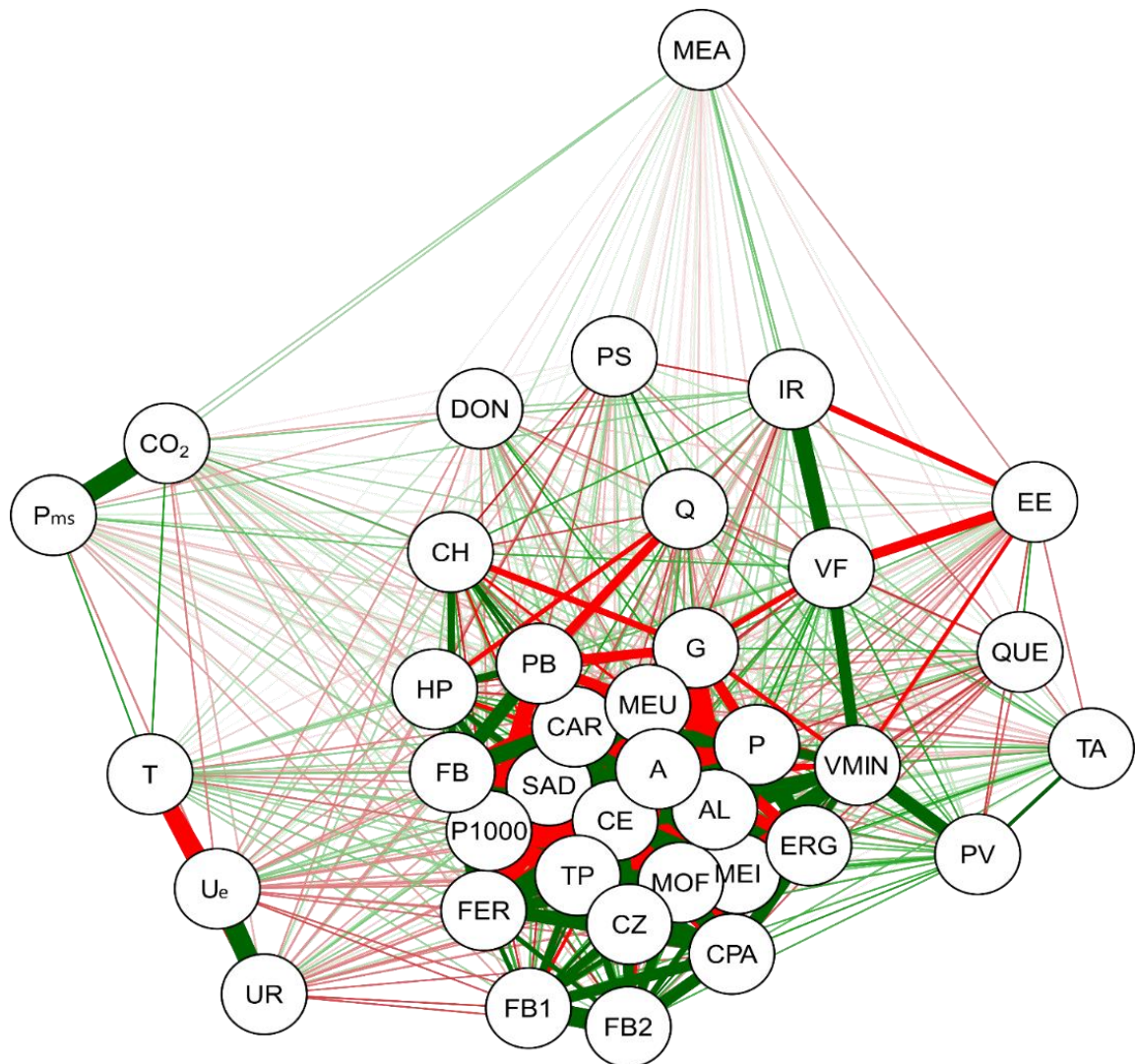
A rede de correlação de Pearson gerada está contida na Figura 30. É possível ver na parte central inferior desta Figura um grupo de variáveis (G, PB, HP, FB, CAR, P, A, SAD, P1000, CE, AL, VMI, ERG, MEI, MOF, TP, CZ, FER, CPA, FB1 e FB2) altamente correlacionados.

Em relação as características viscoamilográficas, tem-se que a variável VF correlacionou-se positivamente com IR e VMIN e negativamente com EE, ou seja, quanto maior a quantidade de gordura presente nos grãos, menor a viscosidade final das amostras de milho e quanto maior a viscosidade final das amostras de milho, maior o índice de retrogradação e viscosidade. Ainda, verificou-se a correlação positiva entre VMIN e PV e negativa entre IR e EE, em que uma maior viscosidade mínima acarreta em maior pico de viscosidade e quanto maior a presença de gordura nos grãos, menor o índice de retrogradação da amostra.

Os resultados observados na análise de correlação são consistentes com o comportamento das variáveis qualitativas em relação aos fatores de tratamento estabelecidos para o armazenamento do milho. As relações fortes positivas da UR x U_e e da P_{ms} x CO₂ e forte negativa da U_e x T indicaram indiretamente as alterações positivas e negativas de qualidade

dos grãos, corroborando com os resultados encontrados por Dubal (2021) ao estudar a Influência de teores de impurezas e resíduos no monitoramento de variáveis indiretas para detecção precoce da qualidade de soja armazenada em silos protótipos verticais.

Figura 30 - Rede de correlação de Pearson entre as variáveis físicas, físico-químicas e outras variáveis avaliadas no experimento. CH = Grãos Chochos e Imaturos; FER = Grãos Fermentados; CAR = Grãos Carunchados; CE = Condutividade Elétrica; MEI = Matérias Estranhas e Impurezas; MOF = Grãos Mofados; QUE = Grãos Quebrados; MEU = Massa Específica Unitária; MEA = Massa Específica Aparente; SAD = Grãos Sadios; P1000 = Peso de mil grãos e G = Germinação. IR = Índice de Retrogradação; VF = Viscosidade Final; VMIN = Viscosidade Mínima; PB = Proteína Bruta; HP = Horário de Pico; FB = Fibra Bruta; TP = Temperatura de Pico; AL = Acidez Lipídica; CZ = Cinzas; PV = Pico de Viscosidade; PS = Proteína Solúvel; Q = Quebra de Viscosidade; EE = Extrato Etéreo; A = Amido; T = Temperatura; CO₂ = Concentração de Dióxido de Carbono; PMS = Perda de Matéria Seca; UR = Umidade Relativa do ar; U_e = Umidade de equilíbrio higroscópico; DON = Tricotecenos DON; FB1 = Fumonisina B1; FB2 = Fumonisina B2; CPA = Ácido Ciclopiazônico; P = Porosidade Intergranular e ERG = Ergosterol.



FONTE: Autora.

6 CONCLUSÕES

Houve redução da qualidade física e físico-química dos grãos de milho ao longo do armazenamento, principalmente em grãos com maior teor de água, sendo este o fator de maior influência sobre a qualidade dos grãos de milho, visto que grãos armazenados com teor de água acima de 12% tiveram suas alterações metabólicas aceleradas, maior processo respiratório, maior perda de matéria seca e conseqüentemente menor tempo de armazenamento seguro.

O monitoramento das variáveis de temperatura, umidade relativa e CO₂ no ar intergranular se correlacionou com os resultados de qualidade dos grãos de milho, portanto, essas variáveis podem ser utilizadas como predição simples e rápida no controle da qualidade dos grãos ao longo do armazenamento.

Considerando que o armazenamento tem como objetivo evitar as perdas e preservar a qualidade inicial do produto, suprir as demandas durante a entressafra e permitir aguardar o melhor momento para comercialização do produto, o monitoramento é de suma importância pois possibilita a adequada gestão de processos, garantindo a qualidade do produto e maior rentabilidade. A utilização de sensores de CO₂ no monitoramento mostrou eficácia no controle da qualidade de grãos de milho durante o armazenamento, uma vez que otimiza a detecção da deterioração, facilitando a tomada de decisões e diminuindo as perdas quanti e qualitativas.

REFERÊNCIAS

AACC - AMERICAN ASSOCIATION OF CEREAL CHEMISTS. **Approved methods of the American Association of Cereal Chemists**. St. Paul, 1995.

AGUIAR, Raimundo Wagner de Souza *et al.* Efeito do dióxido do carbono, temperatura e armazenamento sobre sementes de soja e microflora associada. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 43, n. 3, p. 554-560, set. 2012. Disponível em: <http://ccarevista.ufc.br/seer/index.php/ccarevista/article/view/1596/718>. Acesso em: 13 de abr. de 2021.

AIKO, Visenuo; METHA, Alka. Occurrence, detection and detoxification of mycotoxins. **Bioscience Journal**, Índia, v. 40, n. 5, p. 943-954, 28 nov. 2015. DOI: 10.1007/s12038-015-9569-6. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12038-015-9569-6>. Acesso em: 15 out. 2021.

ALMEIDA, Raphael Lucas Jacinto *et al.* Análise de granulometria e umidade de farinhas de milho flocada comercializadas na cidade de Campina Grande-PB. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, Paraíba, v. 7, n. 2, p. 185-189, nov. 2017. Disponível em: <https://gvaa.com.br/revista/index.php/REBAGRO/article/view/5156>. Acesso em: 12 de fev. de 2021.

ALTAY, Filiz; GUNASEKARAN, Sundaram. Influence of drying temperature, water content, and heating rate on gelatinization of corn starches. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington/EUA, v. 54, p. 4235-4245, maio 2006. DOI: 10.1021/jf0527089. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jf0527089>. Acesso em: 10 de mar. de 2021.

AMIR, Rai Muhammad *et al.* Application of Fourier Transform Infrared Spectroscopy for the Identification of Wheat Varieties. **Journal of Food Science and Technology**, Índia, v. 50, n. 5, p. 1018-1023, sept./oct. 2013. DOI: 10.1007/s13197-011-0424-y. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-011-0424-y>. Acesso em: 11 de nov. de 2021.

ANDRADE, Mariane A.; LANÇAS Fernando Mauro. Estado-da-arte na análise cromatográfica de Ocratoxina A em amostras de alimentos. **Scientia Chromatographica**, São Carlos/SP v. 7, n. 1, p. 31-52, jan. 2015. DOI: 10.4322/sc.2015.015. Disponível em: <https://iicweb.org/scientiachromatographica/v7n1doi10-4322sc-2015-015/>. Acesso em: 21 de dez. de 2021.

ANTUNES, Arlindo Modesto *et al.* Development of an automated system of aeration for grain storage. **African Journal of Agricultural Research**, África, v. 11, n. 43, p. 4293-4303, oct. 2016. DOI: 10.5897/AJAR2016.11538. Disponível em: <https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-full-text-pdf/8B8931C61379>. Acesso em: 12 de jun. 2021.

ANVISA - AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução - RDC Nº 138, de 8 de fevereiro de 2017**, 2017.

ASCHERI, J. L. R.; GERMANI, R. Protocolo de qualidade do milho. Rio de Janeiro: **Embrapa Agroindústria de Alimentos**, 2004. 23p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/415866/protocolo-de-qualidade-de-milho>. Acesso em: 11 de set de 2021.

ATUNGULU, Griffiths G.; THOTE, Supriya; WILSON, Shantae. Dry Matter Loss for Hybrid Rough Rice Stored Under Reduced-Oxygen Conditions. **Journal Cereal Chemistry**, Fayetteville/USA, v. 94, n. 3, p. 497-501, 2017. DOI: 10.1094/CCHEM-07-16-0198-R. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1094/CCHEM-07-16-0198-R>. Acesso em: 17 de out. de 2021.

AZEVEDO, Loianny Faria *et al.* Capacidade estática de armazenamento de grãos no Brasil. **XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Rio de Janeiro, 2008.

BATEY, I. L. Interpretation of RVA curves. In: CROSBIE, G. B.; ROSS, A. S. **The RVA handbook**. Saint Paul: AACC International, 2007. p. 19-30. ISBN 9781891127540.

BAUDET, Leopoldo.; VILLELA, Francisco Amaral. Armazenamento. **Seed News**, Pelotas, v. 4, n. 4, p. 28- 32, jul. 2000. Disponível em: < <https://seednews.com.br/artigos/2106-armazenamento-edicao-julho-2000>> Acesso em: 10 de mar. de 2021.

BEMILLER, James N. Corn Starch Modification In: SALDIVAR, Sergio O. Serna. **Corn. Chemistry and technology**, Duxford, 2019, p. 537-549. DOI: 10.1016/B978-0-12-811971-6.00019-X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012811971600019X>. Acesso em: 18 de nov. de 2021.

BEMILLER, James N.; WHISTLER, Roy. **Starch: Chemistry and technology**. 2. ed. Food Science and Technology, International series, Elsevier, 2009. ISBN: 978-0-12-746275-2.

BERN, Carl.; QUICK, Graeme; HERUM, Floyd. Harvesting and Postharvest Management. In: **Corn Chemistry and Technology**. 3. ed., 2019, p. 109- 145. ISBN: 978-0-12-811886-3.

BERN, Carl; STEELE, James, MOREY, R. Vance. Shelled corn CO₂ evolution and storage time for 0.5% dry matter loss. **Applied Engineering in Agriculture**, Ames/Iowa, v. 18, n. 6, p. 703-706, sept. 2002. DOI: 10.13031/2013.11325. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=11325&CID=aeaj2002&v=18&i=6&T=1>. Acesso em: 18 de dez. de 2021.

BINELO, Manuel O. *et al.* Airflow simulation and inlet pressure profile optimization of a grain storage bin aeration system. **Computers and Electronics in Agriculture**, Netherlands, v. 164, p. 104-923, e104923, sept. 2019. DOI: 10.1016/j.compag.2019.104923. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169919307483?via%3Dihub>. Acesso em: 12 de maio de 2021.

BOKUSHEVA, Raushan *et al.* Factors determining the adoption and impact of a post-harvest storage technology. **Food Security**, v. 4, p. 279-293, apr. 2012. DOI: 10.1007/s12571-012-0184-1. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12571-012-0184-1>. Acesso em: 12 de dez. de 2021.

BOOTH, R.; BASON, M. Principles of operation and experimental techniques. In: CROSBIE, G. B.; ROSS, A. S. **The RVA handbook**. Saint Paul: AACC International, 2007, p. 1-17. ISBN 9781891127540.

- BORÉM, Flávio Meira *et al.* Effect of intermittent drying and storage on parchment coffee quality. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 2, p. 609-616, oct. 2014. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/18209>. Acesso em: 16 de mar. de 2021.
- BOTELHO, Fernando; BOTELHO, Silvia; SOBREIRA, Marjorie. Influência do teor de impurezas nas propriedades físicas de milho, soja e arroz em casca. **Scientific Electronic Archives**, v. 12, n. 1, p. 52-58, fev. 2019. Disponível em: <https://sea.ufr.edu.br/SEA/article/view/632>. Acesso em: 18 de mar. de 2021.
- BRASIL. **Instrução Normativa 60/2011 de 23/12/2011**, 2011: Regulamento Técnico do Milho. Brasília, 10p., 2011.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Regras para análise de sementes**. 1. ed. Brasília, 399p., 2009.
- BROOKER, Donald B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, Carl W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinold, 1992. 450p.
- CARDOSO, Rafael Brito; BINOTTI, Flávio Ferreira da Silva; CARDOSO, Eliana Duarte. Potencial fisiológico de sementes de crambe em função de embalagens e armazenamento. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 42, n. 3, p. 272-278, jul./set 2012. DOI: 10.1590/s1983-40632012000300006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pat/a/RdvLS3DT8k6m7wqrnWYYqnF/>. Acesso em: 23 de nov. de 2021.
- CARNEIRO, Zenilda de Fátima. **Resistência de variedades de milho crioulo ao gorgulho-do-milho sitophilus zeamais (coleoptera: curculionidae)**. 2019. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Pato Branco, 2019. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/4103>. Acesso em: 10 nov. 2021.
- CHANDRASHEKAR, A.; MAZHAR, H. The biochemical basis and implications of grain strength in sorghum and maize. **Journal of Cereal Science**, v. 30, p. 193-207, nov. 1999. DOI: 10.1006/jcrs.1999.0264. Disponível em: <https://europepmc.org/article/AGR/IND22056127>. Acesso em: 13 de jul. de 2021.
- CHELLADURAI, Vellaichamy *et al.* Quality changes in 12% moisture content canola stored in silo bags under Canadian Prairie conditions. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v.68, p.33-43, apr. 2016. DOI: 10.1016/j.jspr.2016.04.002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022474X16300133?via%3Dihub>. Acesso em: 19 de set. de 2021.
- CHEN, Sheng-Tung; KUO, Hsiao-I; CHEN, Chi-Chung. Modeling the relationship between the oil price and global food prices. **Applied Energy**, v. 87, p. 2517-2525, mar. 2010. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.02.020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261910000516?via%3Dihub>. Acesso em: 18 de abr. de 2021.
- CHITRAKAR, Sinora; BERN, Carl J.; SHRESTHA, Dev S. Quantifying corn deterioration due to fungal growth by use of CO₂-sensitive gel. **Applied Engineering in Agriculture**, Ames/Iowa, v. 22, n. 1, p. 81-86, 2006. DOI: 10.13031/2013.20174. Disponível em:

<https://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=20174&CID=aeaj2006&v=22&i=1&T=1>. Acesso em: 29 de dez. de 2021.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Instruções para amostragem de grãos. **Boletim Téc. Série Armazenamento**, Brasília, v.1, n.1, p. 1-32, 2015.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série Histórica da Armazenagem**, Brasília, 2019. Online. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/armazenagem/serie-historica-da-armazenagem>> Acesso em: 8 de abr. de 2021.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Série Histórica das Safras – Grãos (Por Unidade da Federação)**, Brasília, 2021. Online. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>: Acesso em: 8 de abr. de 2021.

CORADI, Paulo Carteri *et al.* Quality of stored grain of corn in different conditions. **Científica**, Jaboticabal, v. 42, n.2, p. 118-133, 2014. DOI: 10.15361/1984-5529.2014v42n2p118-133. Disponível em: <http://cientifica.org.br/index.php/cientifica/article/view/535>. Acesso em 14 de out. de 2021.

CORADI, Paulo Carteri *et al.* Loss of dry matter in grain corn stored under different conditions and effects on quality. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, Paraná, v. 9, n. 1, p. 1757-1770, 2015a. DOI: 10.3895/rbta.v9n1.1868. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbta/article/view/1868>. Acesso em: 16 de ago. de 2021.

CORADI, Paulo Carteri *et al.* Alternatives of storage of corn grains for the conditions of the brazilian cerrado. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 32, n. 1, p. 29-40, feb. 2016b. DOI: 10.14393/BJ-v32n1a2016-29119. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/29119>. Acesso em: 22 de jan. de 2021.

CORADI, Paulo Carteri *et al.* Drying and storage of corn grains for ethanol production in Brazil. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 32, n. 5, p. 1175-1190, oct. 2016a. DOI: 10.14393/BJ-v32n5a2016-32754. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/32754/19005>. Acesso em: 19 de ago. de 2021.

CORADI, Paulo Carteri *et al.* Qualidade de grãos de milho após secagem e armazenamento em ambiente natural e resfriamento artificial. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 14, n. 3, p. 420-432, dez. 2015b. DOI: 10.18512/1980-6477/rbms.v14n3p420-432. Disponível em: <http://www.bibliotekevvirtual.org/index.php/2013-02-07-03-02-35/2013-02-07-03-03-11/1911-rbms/v14n03/19866-qualidade-de-graos-de-milho-apos-secagem-e-armazenamento-em-ambiente-natural-e-resfriamento-artificial.html>. Acesso em: 7 de abr. de 2021.

CORADI, Paulo Carteri; LEMES, Ângelo Francisco Calegare. Validation of an experimental prototype of thick-layer fixed bed dryer and determination of the quality of the dried soybean grains. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 40, e35285, 2018. DOI: 10.4025/actasciagron.v40i1.35285. Disponível em:

<https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/35285>. Acesso em: 11 de ago. de 2021.

COSTA, André Rodrigues *et al.* Qualidade de grãos de milho armazenados em silos bolsa. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 2, p. 200-207, jun. 2010. DOI: 10.1590/S1806-66902010000200005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/WVPWqzVnVpTGSSQdnf7XJhm/?lang=pt>. Acesso em: 12 de nov. de 2021.

DELCOUR, Jan A.; HOSENEY, R. Carl. **Principles of Cereal Science and Technology**. 3. ed. AACC International, 2010, 270p.

DILKIN, Paulo *et al.* Classificação macroscópica, identificação da microbiota fúngica e produção de alfa toxinas em híbridos de milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 1, p. 137-141, mar. 2000. DOI: 10.1590/S0103-84782000000100022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/95Mzn8YY4QFDmKkXn74y6pP/?lang=pt>. Acesso em: 18 de nov. de 2021.

DIONELLO, Rafael G. *et al.* Temperatura do ar na secagem estacionária e tempo de armazenamento na qualidade de grãos de milho. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 6, n. 2, p. 137-143, ago. 2000. DOI: 10.18539/CAST.V6I2.319. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/CAST/article/view/319>. Acesso em: 27 de nov. de 2021.

DUBAL, Ítala Thaísa Padilha. **Influência de teores de impurezas e resíduos no monitoramento de variáveis indiretas para detecção precoce da qualidade de soja armazenada em silos verticais**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021.

ELIAS, Moacir Cardoso *et al.* Umidade de colheita, métodos de secagem e tempo de armazenamento na qualidade tecnológica de grãos de trigo (cv. ‘Embrapa 16’). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 25-30, fev. 2009. DOI: 10.1590/S0103-84782009000100005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/4yJFmYJszktH6gywk9g638P/?lang=pt>. Acesso em: 21 de jan. de 2021.

ELIAS, Moacir Cardoso *et al.* Physicochemical properties and enzymatic bean grains dried at different temperatures and stored for 225 days. **Semina. Ciências Agrárias**, Londrina, v. 37, n. 3, p. 1295-1306, jun. 2016. DOI: 10.5433/1679-0359.2016v37n3p1295. Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/21647>. Acesso em: 14 de jun. de 2021.

FALADE, Kolawole O.; CHRISTOPHER, Akinpelu S. Physical, functional, pasting and thermal properties of flours and starches of six Nigerian rice cultivars. **Food Hydrocolloids**, v. 44, p. 478-490, 2015. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2014.10.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268005X1400366X?via%3Dihub>. Acesso em: 11 de mar. de 2021.

FANG, J. M. *et al.* The Preparation and Characterization of a Series of Chemically Modified Potato Starches. **Carbohydrate Polymers**, v. 47, n. 3, p. 245–252, 2002. DOI: 10.1016/S0144-8617(01)00187-4. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861701001874?via%3Dihub>. Acesso em: 19 de out. de 2021.

FARONI, Rita D'Antonino *et al.* Avaliação qualitativa e quantitativa do milho em diferentes condições de armazenamento. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 13, n. 3, p. 193-201, set. 2005. Disponível em: <https://docplayer.com.br/71503084-Avaliacao-qualitativa-e-quantitativa-do-milho-em-diferentes-condicoes-de-armazenamento.html>. Acesso em: 12 de abr. de 2021.

FERRARI FILHO, Eder *et al.* Efeito de diferentes fontes energéticas na secagem e de tempos de armazenagem sobre as características físicas e tecnológicas de grãos de milho. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 20, n. 1/2, p. 68-76, 2014. Disponível em: <http://revistapag.agricultura.rs.gov.br/ojs/index.php/revistapag/article/view/81>. Acesso em: 21 de jul. de 2021.

FERRASA, Marcelo; BIAGGIONI, Marco Antônio M.; DIAS, Ariângelo Hauer. Sistema de monitoramento de temperatura e umidade em silo grane-leiro via radiofrequência (RF). **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n. 2, p. 139-156, 2010. DOI: 10.17224/EnergAgric.2010v25n2p139-156. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/61>. Acesso em: 27 de julho de 2021.

FERREIRA Maéve Carvalho; FREITAS Daniela Fernanda de; MOREIRA Edimar Agnaldo. Identificação de aflatoxinas em paçocas de amendoim comercializadas na cidade de Lavras-MG. **Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada**, v. 35, n. 4, p. 717-22, 2014. Disponível em: <http://rcfba.fcfar.unesp.br/index.php/ojs/article/view/104>. Acesso em: 14 de ago. de 2021.

FERREIRA, Daniel Furtado. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia (UFLA)**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, dez. 2011. DOI: 10.1590/s1413-70542011000600001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cagro/a/yjKLJXN9KysfmX6rvL93TSh/?lang=en>. Acesso em: 17 de maio de 2021.

GAO, Yan *et al.* Physicochemical Properties of Lipase-Catalyzed Laurylation of Cornstarch. **Starch-Stärke**, Weinheim, v. 66, n. 5-6, p.450-456, 2014. DOI: 10.1002/star.201300180. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/star.201300180>. Acesso em: 5 de abr. de 2021.

GARCIA-CELA, E *et al.* Influence of storage environment on maize grain: CO₂ production, dry matter losses and aflatoxins contamination. **Food Additives & Contaminants**, v. 36, p. 175-185, jan. 2019. DOI: 10.1080/19440049.2018.1556403. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19440049.2018.1556403>. Acesso em: 12 de maio de 2021.

GENKAWA, Takuma *et al.* Development of a low-moisture-content storage system for brown rice: Storability at decreased moisture content. **Biosystems Engineering**, v. 99, n. 4, p. 515-522, 2008. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2007.12.011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511008000056?via%3Dihub>. Acesso em: 19 de mar. de 2021.

GOMES, Maximilian de Souza *et al.* Variabilidade genética em linhagens de milho nas características relacionadas com a produtividade de silagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 9, p. 879-885, set. 2004. DOI: 10.1590/s0100-204x2004000900007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/KF9MpMcCK4K35ybmVRbqfKG/?lang=pt>. Acesso em: 12 de fev. 2021.

GONZALES, H.B; ARMSTRONG P.R.; MAGHIRANG, R.G. Simultaneous monitoring of stored grain with relative humidity, temperature, and carbon dioxide sensors. **Applied Engineering in Agriculture**, Ames/Iowa, v.25, n.4, p. 595-604, 2009. DOI: 10.13031/2013.27466. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=27466&CID=aeaj2009&v=25&i=4&T=1>. Acesso em: 16 de nov. de 2021.

HUANG, Haibo *et al.* Diffusion and production of carbon dioxide in bulk corn at various temperatures and moisture contents, **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 55, p. 21-26, oct. 2013. DOI: 10.1016/j.jspr.2013.07.002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022474X13000611?via%3Dihub>. Acesso em: 17 de nov. de 2021.

ILELEJI, Klein *et al.* Detection of a developing hot spot in stored corn with a CO₂ sensor. **Applied Engineering in Agriculture**, Ames/Iowa, v.22, n.2, p. 275-289, 2006. DOI: 10.13031/2013.20274. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=20274&CID=aeaj2006&v=22&i=2&T=1>. Acesso em: 13 de mar. de 2021.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas analíticas: métodos químicos e físicos para análise de alimentos**. 3. ed. São Paulo, 1985. v.1, 533p

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Synthesis report**. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Core Writing Team, Pachauri R K, Meyer L A (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

JAIROCE, Carlos F. *et al.* Insecticide activity of clove essential oil on bean weevil and maize weevil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 20, n. 1, p. 72-77, 2016. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p72-77. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/fMp6FRYfRDSY3tZLw5VCdxQ/?lang=en>. Acesso em: 18 de abr. de 2021.

JAQUES, Lanes Beatriz Acosta *et al.* Efeitos da temperatura e da umidade dos grãos de milho nos parâmetros de qualidade tecnológica. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, v. 4, n. 3, p. 409-420, 2018. DOI: 10.21674/2448-0479.43.409-420. Disponível em: <http://revista.uergs.edu.br/index.php/revuergs/article/view/1306>. Acesso em: 23 de set. de 2021.

Ji, Xiaofeng *et al.* Occurrence of deoxynivalenol (DON) in cereal-based food products marketed through e-commerce stores and an assessment of dietary exposure of Chinese consumers to DON. **Food Control**, v. 92, p. 391-398, 2018. DOI:

10.1016/j.foodcont.2018.05.020. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956713518302512?via%3Dihub>. Acesso em: 19 de fev. de 2021.

JIAN, F. *et al.* Interstitial concentrations of carbon dioxide and oxygen in stored canola, soybean, and wheat seeds under various conditions. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 57, p. 63-72, abr. 2014. DOI: 10.1016/j.jspr.2013.12.002. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022474X13000994?via%3Dihub>. Acesso em: 17 de nov. de 2021.

JUNIOR, Antônio Bisconsin *et al.* Uso da radiação gama na agricultura. **Revista de Educação Tecnológica e Científica (EDUTEC)**, Ariquemes/RO, v. 1, n. 1, p. 1-18, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/26835>. Acesso em: 17 de dezembro de 2021.

JUNIOR, Arnaldo Tiecker *et al.* Qualidade físico-química de grãos de milho armazenados com diferentes umidades em ambientes hermético e não hermético. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 13, n. 2, p. 174-186, 2014. DOI: 10.18512/1980-6477/rbms.v13n2p174-186. Disponível em: <http://www.bibliotekevvirtual.org/index.php/2013-02-07-03-02-35/2013-02-07-03-03-11/1163-rbms/v13n02/11992-qualidade-fisico-quimica-de-graos-de-milho-armazenados-com-diferentes-umidades-em-ambientes-hermetico-e-nao-hermetico.html>. Acesso em: 16 de nov. de 2021.

JUODEIKIENE, G *et al.* Acoustic sensing of deoxynivalenol in co-occurrence with zearalenone and T-2/HT-2 toxin in winter wheat cultivar Sirvinta from Lithuania, **World Mycotoxin Journal**, Belfast, v. 4, n. 4, p. 395-404, nov. 2011. DOI: 10.3920/WMJ2011.1297. Disponível em:
<https://www.wageningenacademic.com/doi/10.3920/WMJ2011.1297>. Acesso em: 18 de out. de 2021.

KALETA, Agnieszka; GÓRNICKI, Krzysztof. Criteria of determination of safe grain storage time - a review. **Advances in Agrophysical Research**, London, p. 295-318, 2013. DOI: 10.5772/52235. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/39944>. Acesso em: 13 de set. de 2021.

KARUNAKARAN, Chithra *et al.* Safe storage time of high moisture wheat. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 37, n. 3, p. 303-312, July 2001. DOI: 10.1016/S0022-474X(00)00033-3. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022474X00000333?via%3Dihub>. Acesso em: 18 de fev. de 2021.

KHATCHATOURIAN, Oleg A. *et al.* Models to predict the thermal state of rice stored in aerated vertical silos. **Biosystems Engineering**, v. 161, p. 14-23, sept. 2017. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2017.06.013. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511017302416?via%3Dihub>. Acesso em: 20 de mar. de 2021.

KIBAR, Hakan. Influence of storage conditions on the quality properties of wheat varieties. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 62, p. 8-15, may. 2015. DOI: 10.1016/j.jspr.2015.03.001. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022474X15000144?via%3Dihub>. Acesso em: 21 de dez. de 2021.

KONOPKA, Iwona; KOZIROK, Witold; ROTKIEWICZ, Daniela. Lipids and carotenoids of wheat grain and flour and attempt of correlating them with digital image analysis of kernel surface and cross-sections. **Food Research International**, v. 37, n. 5, p. 429-438, jun. 2004. DOI: 10.1016/j.foodres.2003.12.009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S096399690400047X>. Acesso em: 16 de abr. de 2021.

KRNJAJA, Vesna *et al.* MANDIĆ, V.; MIĆIĆ N. Fungal contamination of maize grain samples with a special focus on toxigenic genera. **Biotechnology in Animal Husbandry**, Belgrade-Zemun v. 33, n. 2, p. 233-241, 2017. DOI: 10.2298/BAH1702233K. Disponível em: <http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=1450-91561702233K#.Yeji5HrMJPY>. Acesso em: 14 de maio de 2021.

KRYZANOWSKI, Francisco Carlos; NETO, José de Barros França; HENNING, Ademir Assis. **Relato dos testes de vigor disponíveis para as grandes culturas**. Londrina, v. 1, n. 2, p. 15-53, 1991.

KUMAR, Vinod; BASU, M.S.; RAJENDRAN, T.P.; Mycotoxin research and mycoflora in some commercially important agricultural commodities. **Crop Protection**, v. 27, n. 6, p. 891-905, 2008. DOI: 10.1016/j.cropro.2007.12.011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026121940700333X?via%3Dihub>. Acesso em: 14 de mar. de 2021.

LAWTON, John W. Zein: A History of Processing and Use. **Cereal Chemistry Journal**, v. 79, n. 1, p. 1-18, feb. 2002. DOI: 10.1094/chem.2002.79.1.1. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1094/CCHEM.2002.79.1.1>. Acesso em: 23 de fev. de 2022.

LANE. Brett; WOLOSHUK, Charles. Impact of storage environment on the efficacy of hermetic storage bags. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 72, n. 1 pp. 83-89, may. 2017. DOI: 10.1016/j.jspr.2017.03.008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022474X17300322?via%3Dihub>. Acesso em: 12 de jul. de 2021.

LARKIN, Peter J. **Infrared and Raman spectroscopy: principles and spectral interpretation**. Elsevier, 2007. *E-book* (286 p.). ISBN: 978-0-12-386984-5.

LIMA, Rafael Friedrich de Lima *et al.* Qualidade de grãos de milho submetidos à secagem com lenha e posteriormente armazenados em ambiente natural. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 15, n. 3, p. 594- 606, 2016. DOI: 10.18512/1980-6477/rbms.v15n3p594-606. Disponível em: <http://rbms.cnpms.embrapa.br/index.php/ojs/article/view/579>. Acesso em: 21 de out. de 2021.

LIU, Keshun; MCWATTERS, Kay H.; PHILLIPS, R. Dixon. Protein insolubilization and thermal destabilization during storage as related to hard-to-cook defect in cowpeas. **Journal of Agricultural Food Chemistry**, Washington/EUA, v. 40, p. 2483-2487, 1992. DOI:

10.1021/jf00024a028. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jf00024a028>. Acesso em: 11 de abr. de 2021.

MACIEL, Gisele *et al.* Determination of safe storage moisture content of soybean expeller by means of sorption isotherms and product respiration (PS10-8 – 6160). **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 86, e010567, 2020. DOI: 10.1016/j.jspr.2019.101567. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022474X19304175?via%3Dihub>. Acesso em: 25 de out. de 2

MAIER Dirk *et al.* Monitoring carbon dioxide levels for early detection of spoilage and pests in stored grain. **9th International Working Conference on Stored Product Protection**, p. 1174- 1181, 2006. Disponível em: <http://spiru.cgahr.ksu.edu/proj/iwcspp/iwcspp9.html>. Acesso em: 13 de maio de 2021.

MAIER, Dirk *et al.* Monitoring carbon dioxide concentration for early detection of spoilage in stored grain. **10th International Working Conference on Stored Product Protection**, p. 512-516, 2010. DOI: 10.5073/jka.2010.425.332. Disponível em: <https://ojs.openagrar.de/index.php/JKA/article/view/541>. Acesso em: 16 de out. de 2021.

MALUMBA, Paul *et al.* Influence of drying temperature on functional properties of wet-milled starch granules. **Carbohydrate Polymers**, v. 75, n. 2, p. 299-306, jan. 2009. DOI: 10.1016/j.carbpol.2008.07.027. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861708003366?via%3Dihub>. Acesso em: 18 de out. de 2021.

MANLEY, Marena; VAN ZYL, Louis; OSBORNE, Brian. G. Using Fourier Transform Near-Infrared Spectroscopy in Determining Kernel Hardness, Protein and Moisture Content of Whole Wheat Flour. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 10, n. 1, p. 71–76, jan. 2002. DOI: 10.1255/jnirs.323. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1255/jnirs.323>. Acesso em: 12 de dez. de 2021.

MOHSENIN, Nuri N. **Physical properties of plant and animal materials**. 1. ed. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p. ISBN 9780677023007.

MOOG, D. J. P., STROSHINE, Richard L.; SEITZ, L. M. Fungal susceptibility at four temperature-moisture combinations and carbon dioxide kit color reader evaluation. **Cereal Chemistry**, v. 87, n. 3, p. 182-189, jun. 2010. DOI: 10.1094/cchem-87-3-0182. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1094/CCHEM-87-3-0182>. Acesso em: 3 de abr. de 2021.

MUIR, William E.; WHITE, Noel D.G. Microorganisms in stored grain. *In*: MUIR, William E. **Grain Preservation Biosystems**, Manitoba, 2000, p. 1-17.

NAVARRO, Shlomo; NOYES, Ronald. **The mechanics and physics of modern grain aeration management**. New York: crc press, 2002. 647 p. ISBN 10: 0849313554, 13: 9780849313554.

NEETHIRAJAN, Suresh *et al.* Development of carbon dioxide (CO₂) sensor for grain quality monitoring. **Biosystems Engineering**, v. 106, n. 4, p. 395–404, aug. 2010. DOI:

10.1016/j.biosystemseng.2010.05.002. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511010000917?via%3Dihub>.
 Acesso em: 19 de ago. de 2021.

NEETHIRAJAN, Suresh; JAYAS, Digvir S.; SADISTAP, Shashikant. Carbon dioxide (CO₂) sensors for the agri-food industry—a review. **Food Bioprocess. Technol**, v. 2, p. 115–121, nov. 2009. DOI: 10.1007/s11947-008-0154-y. Disponível em:
<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11947-008-0154-y>. Acesso em: 22 de set. de 2021.

NORAMBUENA, Carolina *et al.* Insecticidal activity of *Laureliopsis philippiana* (Looser) schodde (atherospermataceae) essential oil against *Sitophilus* spp. (coleoptera curculionidae). **Chilean journal of agricultural research**, Chillán, v. 76, n. 3, p. 330-336, sept. 2016. DOI: 10.4067/S0718-58392016000300010. Disponível em:
https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-58392016000300010&lng=en&nrm=iso&tlng=en. Acesso em: 9 de jan. de 2021.

OCHANDIO, Dario *et al.* Modelling respiration rate of soybean seeds (*Glycine max* (L.)) in hermetic storage. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 74, p. 36-45, dec. 2017. DOI: 10.1016/j.jspr.2017.09.001. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022474X17300784?via%3Dihub>. Acesso em: 13 de out. de 2021.

OLIVEIRA, Dillaine Hening *et al.* Ocorrência de Fumonisinias em milho e derivados, destinados à alimentação humana/Occurrence of fumonisin in corn and derivatives, intended for human consumption. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 5, p. 31305-31321, may. 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n5-550. Disponível em:
<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/10699/8934>. Acesso em: 10 de mar. de 2021.

OLIVEIRA, Marília Boff. **Efeito de diferentes operações de secagem e armazenagem na qualidade de duas cultivares de soja (*Glycine Max* (L.) Merrill)**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

PAES, Maria Cristina Dias. Aspectos Físicos, Químicos e Tecnológicos do Grão de Milho. **Circular Técnica 75**, Embrapa, 2006. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/489376/aspectos-fisicos-quimicos-e-tecnologicos-do-grao-de-milho>. Acesso em: 24 de ago. de 2021.

PARAGINSK, Ricardo Tadeu *et al.* Qualidade de grãos de milho armazenados em diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 4, p. 358–363, abr. 2015. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n4p358-363. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/VpMDpzMPscz34JVpfGBDryN/?lang=pt>. Acesso em: 2 de nov. de 2021.

PARAGINSK, Ricardo Tadeu *et al.* Physicochemical, pasting, crystallinity, and morphological properties of starches isolated from maize kernels exhibiting different types of defects. **Food Chemistry**, Washington/EUA, v. 274, p. 330-336, feb. 2019. DOI: 10.1016/j.foodchem.2018.09.026. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814618315954?via%3Dihub>. Acesso em: 16 de abr. de 2021.

PARAGINSK, Ricardo Tadeu *et al.* Physicochemical and pasting properties of maize as affected by storage temperature. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 59, p. 209-214, oct. 2014a. DOI: 10.1016/j.jspr.2014.02.010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022474X14000241?via%3Dihub>. Acesso em: 11 de nov. de 2021.

PARAGINSK, Ricardo Tadeu *et al.* Characteristics of starch isolated from maize as a function of grain storage temperature. **Carbohydrate Polymers**, v. 102, p. 88-94, 2014b. DOI: 10.1016/j.carbpol.2013.11.019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861713011521?via%3Dihub>. Acesso em: 19 de mar. de 2021.

PARK, Chan-Eun *et al.* Changes in physicochemical characteristics of rice during storage at different temperatures. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 48, p. 25-29, jan. 2012. DOI: 10.1016/j.jspr.2011.08.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022474X11000816?via%3Dihub>. Acesso em: 19 de mar. 2021.

PATERNIANI, Ernesto; VIÉGAS, Glauco Pinto. Milhos especiais e seu valor nutritivo. In: TOSELLO, G.A. **Melhoramento e produção de milho**. 2ed., v.1, Campinas: Fundação Cargil, 338p., 1987.

PERDON, Alicia Antônio. *et al.* Effects of rough rice storage conditions on the amylograph and cooking properties of medium-grain rice cv. Bengal. **Cereal Chemistry**, v. 74, n.6, p. 864-867, nov. 1997. DOI: 10.1094/CCHEM.1997.74.6.864. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1094/CCHEM.1997.74.6.864>. Acesso: 10 de mar. de 2021.

PEREIRA, Cristiano Emanuelli *et al.* Peso específico do milho e sua relação com ergosterol, micotoxinas e energia. **Revista Ciências da Vida Seropédica**, Rio de Janeiro, v. 28, 2008. Disponível em: <https://pt.engormix.com/micotoxinas/foruns/peso-especifico-milho-sua-t31514/>. Acesso em: 18 de jun. de 2021.

PESTKA, James J. Deoxynivalenol: mechanisms of action, human exposure, and toxicological relevance. **Archives of Toxicology**, v. 84, p. 663-679, ago. 2010. DOI: 10.1007/s00204-010-0579-8. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00204-010-0579-8>. Acesso em: 20 de out. de 2021.

POZZE, Mariana Breda. **Capacidade estática de armazenamento no Brasil**. 2020. Projeto de pesquisa (Especialização em Planejamento e Estratégias de Desenvolvimento) – Escola Nacional de Administração Pública, 2020.

PRADO, Guilherme. Contaminação de alimentos por micotoxinas no Brasil e no mundo. **Revista de Saúde Pública do SUS/MG**, v. 2. n. 2, 2017. Disponível em: <http://revistageraisaude.mg.gov.br/index.php/gerais41/article/view/298>. Acesso em: 5 de maio de 2021.

PROCÓPIO, Thamara Figueiredo *et al.* Interferência do extrato aquoso de folhas de *Tradescantia spathacea* na fisiologia nutricional do gorgulho-do-milho, *Sitophilus zeamais*. **Revista Arrudea**, Recife, v. 1, n. 1, p. 023–027, 2015. Disponível em: <http://arrudea.recife.pe.gov.br/arrudea/index.php/Arrudea/article/view/5>. Acesso em: 16 de maio de 2021.

PUZZI, Domingos. **Abastecimento e armazenagem de grãos**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1989. 666p. ISBN 8571210136, 9788571210134.

RANI, Puthukulangara Ramachandran *et al.* Storage studies on pinto beans under different moisture contents and temperature regimes. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 52, p. 78-85, jan. 2013. DOI: 10.1016/j.jspr.2012.11.003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022474X12000835?via%3Dihub>. Acesso em: 20 de ago. de 2021.

RAUDIENE, Edita *et al.* Carbon dioxide respiration rates in wheat at various temperatures and moisture contents. **Journal of metrology society of India**, v. 32, n.1, p. 51-58, jan. 2017. DOI: 10.1007/s12647-016-0202-4. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12647-016-0202-4>. Acesso em: 7 de mar. de 2021.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021. URL <https://www.R-project.org/>.

REED, Carl *et al.* Response of storage molds to different initial moisture contents of maize (corn) stored at 25°C, and effect on respiration rate and nutrient composition. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 43, n. 4, p. 443–458, 2007. DOI: 10.1016/j.jspr.2006.12.006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022474X07000112?via%3Dihub>. Acesso em: 12 de mar. de 2021.

REGO, Filipe *et al.* Fast determination of lignocellulosic composition of poplar biomass by thermogravimetry. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 375–380, mar. 2019. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.01.037. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953419300467?via%3Dihub>. Acesso em: 19 de ago. de 2021.

REHMAN, Zia-Ur; HABIB, Farzana; ZAFAR, Saeed Iqbal. Nutritional changes in maize (*Zea mays*) during storage at three temperatures. **Food Chemistry**, Washington/EUA, v. 77, n. 2, p. 197-201, may. 2002. DOI: 10.1016/s0308-8146(01)00337-5. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814601003375?via%3Dihub>. Acesso em: 16 de nov. de 2021.

REUSS, R.; DAMCEVSKI, K.; ANNIS, P.C. The impact of temperature, moisture content, grain quality and their interaction on changes in storage vessel atmospheres. **Proceedings of the 6th international working conference on stored-product protection**, v. 1, 1994.

REYES, Isabel *et al.* Structural changes of corn starch during *Saccharomyces cerevisiae* fermentation. **Starch-Stärke**, v. 68, p. 1-11, apr. 2016. DOI:

10.1002/star.201600088. Disponível em:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/star.201600088>. Acesso em: 11 de fev. de 2021.

ROCHA, Marcicleia Pereira *et al.* Sistema de armazenamento e incidência dos principais fungos produtores de micotoxinas em grãos. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 7, p. 50176-50193, jul. 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n7-608. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/13763/11518>. Acesso em: 17 de out. de 2021.

RODRIGUEZ-AMAYA, Delia B. **A guide to carotenoid analysis in foods**. Washington, DC: International Life Sciences Institute, 2001. *E-book* (71 p.), ISBN 1-57881-072-8.

RUKUNUDIN, Ibni Hajar *et al.* Carbon dioxide evolution from fresh and preserved soybeans. **Transactions of the ASAE**, v. 47, n. 3, p. 827-834, 2004. DOI: 10.13031/2013.16079. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=16079&CID=t2004&v=47&i=3&T=1>. Acesso em: 26 de mar. de 2021.

SADHASIVAM, Sudharsan *et al.* Rapid detection and identification of mycotoxigenic fungi and mycotoxins in stored wheat grain. **Toxins**, v. 9, n. 10, 302, sept. 2017. DOI: 10.3390/toxins9100302. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-6651/9/10/302>. Acesso em: 14 de fev. 2021.

SANDHU, Kawaljit Singh; SINGH, Narpinder. Some properties of corn starches II: Physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties. **Food Chemistry**, Washington/EUA, v. 101, p. 1499-1507, 2007. DOI: 10.1016/j.foodchem.2006.01.060. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308814606003074?via%3Dihub>. Acesso em: 12 de maio de 2021.

SANTOS, Silmara Bispo *et al.* Perda de matéria seca em grãos de milho armazenados em bolsas herméticas. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 43, n. 4, p. 674- 682, dez. 2012. DOI: 10.1590/S1806-66902012000400008 Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rca/a/HjxjLBpSrMDkYZWsth3Pvkw/?lang=pt>. Acesso em: 11 dez. de 2021.

SCHIAVON, Rafael Almeida *et al.* Arduino uma tecnologia de baixo custo para a termometria de grãos armazenados. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 5, n. 10, p. 18825-18839, oct. 2019. DOI: 10.34117/bjdv5n10-124. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/337117399_Arduino_uma_tecnologia_de_baixo_custo_para_a_termometria_de_graos_armazenados. Acesso em: 15 de out. de 2021.

SCHUH, Gelson *et al.* Efeitos de dois métodos de secagem sobre a qualidade físicoquímica de grãos de milho safrinha–RS, armazenados por 6 meses. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. 1, p. 235-244, mar. 2011. DOI: 10.5433/1679-0359.2011v32n1p235. Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/3601>. Acesso em: 14 de ago. de 2021.

SCUSSEL, Vildes M. *et al.* Fumonisin in corn (*Zea mays* L.) from Southern Brazil. **Food Additives & Contaminants: Part B**, v. 7, n. 2, p.151-155, aug. 2014. DOI:

10.1080/19393210.2013.862745. Disponível em:
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19393210.2013.862745>. Acesso em: 4 de abr. de 2021.

SHOTWELL, M. A. Y.; LARKINS, Brian A. The Biochemistry and Molecular Biology of Seed Storage Protein. In: MARCUS, Abraham. **The Biochemistry of Plants**, San Diego, v. 15, p: 297-345, 1989.

SILVA, Ana B. Pereira *et al.* Dry matter loss and chemical changes to soybean at 14, 18 and 22% moisture and 30 °C measured in a dynamic grain respiration system. **Applied Engineering in Agriculture**, p.1, 2018. DOI: 10.13031/aim.201801406. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=49617&t=&redir=&redirType=>. Acesso em: 13 de ago. de 2021.

SILVA, Dagma Dionísia *et al.* **Micotoxinas em cadeias produtivas do milho: riscos à saúde animal e humana**. Sete Lagoas/MG: Embrapa Milho e Sorgo, dez. 2015a. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1037807>. Acesso em: 22 de dez. de 2021.

SILVA, Fernanda Chaves *et al.* Taxonomia polifásica para identificação de *Aspergillus* seção flavi: uma revisão. **Revista Ifes Ciência**, Espírito Santo, v. 1, n. 1, p. 18-40, 2015b. DOI: 10.36524/ric.v1i1.235. Disponível em: <https://ojs.ifes.edu.br/index.php/ric/article/view/235>. Acesso em: 18 de abr. de 2021.

SILVA, Luís César. Avaliação de perdas em unidades armazenadoras. **Revista Grãos Brasil**, Espírito Santo, 2009. Ano VIII, n. 38, p. 18-20, set. 2009. Disponível em: <http://search.freefind.com/find.html?lang=pt&id=31880042&pageid=r&mode=ALL&query=avalia%E7%E3o+de+perdas+em+unidades+armazena&search=Buscar>. Acesso em: 19 de dez. de 2021.

SINGH, Digvir; MUIR, W. E., SINHA, R. N. Apparent coefficient of diffusion of carbon dioxide through samples of cereals and rapeseed. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 20, n. 3, p. 169-175, jul. 1984. DOI: 10.1016/0022-474x(84)90026-2.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022474X84900262?via%3Dihub>. Acesso em: 18 de ago. de 2021.

SINGH, Narpinder; SANDHU, Kawaljit Singh; KAUR, Manindes. Characterization of starches separated from Indian chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. **Journal of Food Engineering**, v. 63, n. 4, p. 441-449, 2004. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2003.09.003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877403003558>. Acesso em: 2 de set. de 2021.

SIRISOONTARALAK, Porntip.; NOOMHORM, Athapol. Changes in physicochemical and sensory-properties of irradiated rice during storage. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 43, n. 3, p. 282-289, 2007. DOI: 10.1016/j.jspr.2006.06.008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022474X06000634?via%3Dihub>. Acesso em: 13 de set. de 2021.

STEELE, Jennifer L.; SAUL, R.A.; HUKILL, W.V. Deterioration of shelled corn as measured by carbon dioxide production. **Transactions of the ASAE**, v. 12, n. 5, p. 685-689, 1969. DOI: 10.13031/2013.38928. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=38928&CID=t1969&v=12&i=5&T=1>. Acesso em: 10 de maio de 2021.

SULEIMAN, Rashad A. *et al.* Impact of moisture content and maize weevils on maize quality during hermetic and non-hermetic storage. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 78, p. 1-10, sept. 2018. DOI: 10.1016/j.jspr.2018.05.007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022474X18301061?via%3Dihub>. Acesso em: 19 de nov. de 2021.

SULEIMAN, Rashad A. *et al.* Is flint corn naturally resistant to *Sitophilus zeamais* infestation? **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 60, p. 19–24, jan. 2015. DOI: 10.1016/j.jspr.2014.10.007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022474X1400109X?via%3Dihub>. Acesso em: 15 de out. de 2021.

SULEIMAN, Rashad A.; ROSENTRATER, Kurt A.; BERN, Carl J. Effects of deterioration parameters on storage of maize: a review. **Journal of Natural Sciences Research**, v. 3, n. 9, p. 147-165, jan. 2013. Disponível em: <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/6b7bae7f-bbb2-4bc8-936a-5ca7cc78782a>. Acesso em: 24 de mar. de 2021.

TEIXEIRA, Carlos Alberto. **Avaliação energética e de custo em unidades armazenadoras**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

TEO, Choon Hoong *et al.* On the roles of protein and starch in the ageing of non-waxy rice flour. **Food Chemistry**, Washington/EUA, v. 69, n. 3, p. 229–236, may. 2000. DOI: 10.1016/S0308-8146(99)00271-X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030881469900271X>. Acesso em: 14 de maio de 2021.

TIECKER JUNIOR, Arnaldo *et al.* Qualidade físico-química de grãos de milho armazenados com diferentes umidades em ambientes hermético e não hermético. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.13, n.2, p. 174-186, 2014. DOI: 10.18512/1980-6477/rbms.v13n2p174-186. Disponível em: <http://rbms.cnpms.embrapa.br/index.php/ojs/index>. Acesso em: 23 de set. de 2021.

TIMM, Newton da Silva. **Secagem e processamento de genótipos de milho: efeitos sobre as propriedades físico-químicas e tecnológicas do amido e do óleo**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

TREMATERRA, Pasquale *et al.* Behavioral responses of *Sitophilus zeamais* Motschulsky adults to conditioned grain kernels. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 53, p. 77–81, 2013. DOI: 10.1016/j.jspr.2013.02.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022474X13000258?via%3Dihub>. Acesso em: 15 de out. de 2021.

UBHI, Gagandeep Singh; SADAKA, Sammy. Temporal valuation of corn respiration rates using pressure sensors. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 61, p. 39-47, mar. 2015. DOI: 10.1016/j.jspr.2015.02.004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022474X15000120?via%3Dihub>. Acesso em: 28 de nov. de 2021.

VASQUEZ, Gisele Herbst; BERTOLIN, Danila Comelis; SPEGIORIN, Carolina Natis. Testes de envelhecimento acelerado e de condutividade elétrica para avaliar a qualidade fisiológica de sementes de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). **Revista Brasileira de Biociências**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 18-24, mar. 2011. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/seerbio/ojs/index.php/rbb/article/view/1504>. Acesso em: 21 de fev. de 2021.

WEBER, Érico Aquino. **Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos**. Salles, 2005.

WU, Yanhan *et al.* Design and development of monitoring device for corn grain cleaning loss based on piezoelectric effect. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 179, e105793, dec. 2020. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105793. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169920309923?via%3Dihub>. Acesso em: 26 de dez. de 2021.

YAO, Congxue *et al.* Thermogravimetric analysis and kinetics characteristics of typical grains. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 145, p. 647-659, jan. 2020. DOI: 10.1007/s10973-019-09213-5. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10973-019-09213-5>. Acesso em: 14 de set. de 2021.

YAQOOB, Sanabil *et al.* Characterization of microstructure, physicochemical and functional properties of corn varieties using different analytical techniques. **International Journal of Food Properties**, v. 22, n. 1, p. 572-582, 2019. DOI: 10.1080/10942912.2019.1596124. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2019.1596124>. Acesso em: 18 de jan. de 2021.

ZAMBIASI, Milena Ana *et al.* Physical and technological quality of corn kernels during storage as a function of pre-cleaning. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 19, e1159, 2020. DOI: 10.18512/rbms2020v19e1159. Disponível em: <http://rbms.cnpms.embrapa.br/index.php/ojs/article/view/1159>. Acesso em: 17 de out. de 2021.

ZAVAREZE, Elessandra da Rosa; DIAS, Álvaro Renato Guerra. Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 83, n. 2, p. 317-328, jan. 2011. DOI: 10.1016/j.carbpol.2010.08.064. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144861710007101>. Acesso em: 22 de set. de 2021.

ZHANG, Shuai-Bing *et al.* A site-directed CO₂ detection method for monitoring the spoilage of stored grains by insects and fungi in Chinese horizontal warehouses. **Journal of Stored Products Research**, Manhattan, v. 59, p. 146-151, oct. 2014. DOI: 10.1016/j.jspr.2014.07.002. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022474X14000782?via%3Dihub>.
Acesso em: 13 de dez. de 2021.

ZHOU, Zhongkai *et al.* Effect of rice storage on pasting properties of rice flour. **Food Research International**, v. 36, n. 6, p. 625-634, 2003. DOI: 10.1016/S0963-9969(03)00013-9. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0963996903000139?via%3Dihub>.
Acesso em: 10 de nov. de 2021.

ZIEGLER, Valmor; PARAGINSKI, Ricardo; FERREIRA, Cristiano. Grain storage systems and effects of moisture, temperature and time on grain quality - A review. **Journal of Stored Products Research**, v. 91, mar. 2021, 101770. DOI: 10.1016/j.jspr.2021.101770. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022474X21000096?via%3Dihub>.
Acesso em: 12 de dez. de 2021.