

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

Camila Fontoura Nunes

**DETECÇÃO PRECOCE E PREDIÇÃO DA PERDA DE MATÉRIA SECA  
E QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO EM TEMPO REAL DURANTE  
O TRANSPORTE**

Santa Maria, RS  
2022

**Camila Fontoura Nunes**

**DETECÇÃO PRECOCE E PREDIÇÃO DA PERDA DE MATÉRIA SECA  
E QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO EM TEMPO REAL DURANTE  
O TRANSPORTE**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa 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

Nunes, Camila

Deteccção precoce e predição da perda de matéria seca e qualidade de grãos de milho em tempo real durante o transporte / Camila Nunes.- 2022.

65 p. ; 30 cm

Orientador: Paulo Carteri Coradi

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2022

1. Biosensores I. , Paulo Carteri Coradi II. Título.

sistema de geração automática de ficha catalográfica da unsm. dados fornecidos pelo autor(a). sob supervisão da direção da divisão de processos técnicos da biblioteca central. bibliotecária responsável paula schoenfeldt watta cma 10/1720.


Declaro, CAMILA NUNES, 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.

Camila Fontoura Nunes

**DETECÇÃO PRECOCE E PREDIÇÃO DA PERDA DE MATÉRIA SECA E  
QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO EM TEMPO REAL DURANTE O  
TRANSPORTE**

Defesa de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito para a obtenção do título de **Mestra em Engenharia Agrícola**.

Santa Maria, 22 de março de 2022.

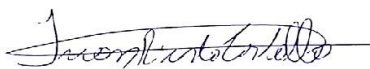


Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi  
UFSM Campus Cachoeira do Sul  
SIAPS-199544

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



Prof. Dr. Moacir Cardoso Elias (UFPEL-DCTA)-videoconferência  
(Membro Externo)



Prof. Dr. Ivan Ricardo Carvalho (UNIJUI-DEAG)-videoconferência  
(Membro Externo)

Santa Maria, RS  
2022

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela vida, por me proteger, guiar e dar forças para alcançar os meus objetivos.

A minha mãe pelos ensinamentos de vida, amor incondicional e apoio nos estudos.

Ao meu pai Jorge Augusto (in memorian), que apesar de ter participado de um pequeno período da minha vida, teve papel fundamental na minha educação, homem memorável o qual só me deu orgulho.

Aos meus irmãos e engenheiros Larissa e Lucas que são minhas maiores fontes de inspiração e orgulho, obrigada por tudo.

A toda a minha família, avós, tios, primos, obrigada pelo amor e incentivo de sempre.

Ao meu dindo Neneco, pela amizade, parceria e apoio sempre que preciso.

Ao professor Dr. Paulo Carteri Coradi, exemplo de profissional, pela orientação, incentivo, paciência e apoio nas pesquisas realizadas, o meu muito obrigada.

A Universidade Federal de Santa Maria pela oportunidade de ter realizado o mestrado no Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola.

A todos os professores que estiveram presentes ao longo do mestrado por todo o conhecimento transmitido.

Ao grupo de pesquisa LAPOS, em especial a Lanes e Nairiane pelo auxílio em todas as etapas do experimento, minha gratidão sempre.

Aos colegas de trabalho da CAAL, pelo apoio na realização da limpeza e secagem das amostras.

A todos que de alguma forma contribuíram para a elaboração da dissertação, o meu muito obrigada.

## EPÍGRAFE

*“Se você pode sonhar, você pode realizar.”*

Tom Fitzgerald

## RESUMO

### DETECÇÃO PRECOCE E PREDIÇÃO DA PERDA DE MATÉRIA SECA E QUALIDADE DE GRÃOS DE MILHO EM TEMPO REAL DURANTE O TRANSPORTE

AUTORA: Camila Fontoura Nunes  
ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi

Levando em consideração que o transporte de grãos pode ser realizado por longas distâncias e que a massa de grãos durante o transporte, muitas vezes, constitui-se com altos teores de água, poderá haver riscos de transferência de calor e umidade e aquecimento da massa de grãos, provocando perdas quanti-qualitativas. Assim, este estudo teve como objetivo validar um sistema de sonda para monitoramento de temperatura, umidade relativa e difusão da concentração de dióxido de carbono na massa de grãos de milho, em tempo real, durante o transporte, em função de diferentes teores de água iniciais (12, 16 e 25% b.u.), para detectar precocemente perdas de matéria seca e prever possíveis alterações na qualidade física dos grãos. Para o monitoramento da massa de grãos durante o transporte rodoviário foi desenvolvido um equipamento portátil. O equipamento constitui-se em um microcontrolador Arduino Mega 2560 como núcleo de controle. O hardware do sistema incluiu três sensores digitais para detectar a temperatura e umidade relativa do ar, um sensor infravermelho não destrutivo para detectar a concentração de CO<sub>2</sub>, módulos de relógio em tempo real e um cartão micro-SD. Os dados de saída do sensor digital, sensor infravermelhos e módulos foram conectados aos terminais de comunicação de I / O do microcontrolador que foram responsáveis pela comunicação física, integração de componentes e cálculo de dados. Os sensores de temperatura e umidade relativa foram fixados em três extremidades de uma barra roscada e o sensor de CO<sub>2</sub> foi fixado na parte central. O módulo de relógio em tempo real e o cartão micro-SD foram acondicionados em uma caixa plástica patola. O software utilizado na placa Arduino foi programado com base na linguagem de programação C++, sendo a maioria das bibliotecas fornecida pela plataforma. O IDE (Integrated Development Environment) do Arduino foi usado para desenvolver o firmware embarcados para os microcontroladores Atmega 2560. Para o monitoramento da massa de grãos de milho, simulando-se uma condição de transporte, fez-se experimentalmente uma caixa com material de compensado nas dimensões de (0,2 x 0,2 x 1,8 m). No perfil da massa de grãos foi inserida a sonda para avaliar o nível de detecção de temperatura, umidade relativa do ar e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na massa de grãos. Para a definição do diâmetro de furo, os sensores de temperatura, umidade relativa e dióxido de carbono foram acondicionados em sondas com os diferentes diâmetros de furos (7,5, 7,0 e 6,5 mm), altura de perfuração (470, 235 e 117,5 mm) e teores de água dos grãos (12,16 e 25%). Os furos foram confeccionados para permitir a entrada de ar e facilitar a resposta dos sensores. Para a escolha do diâmetro e altura de perfuração da sonda que melhor se adequa, um dos requisitos foi que os mesmos atendam os três teores de água analisados. As leituras nos sensores foram realizadas até os valores de temperatura, umidade relativa e concentração de dióxido de carbono se estabilizar. Com a validação do equipamento, confeccionou-se a sonda definitiva com um tubo de cloreto de polivinila de diâmetro de 50 mm e uma altura de 1500 mm, com três regiões perfuradas (superior, central e inferior). Um tubo amostrador de grãos

metálicos foi desenvolvido para acoplar a sonda. Para avaliação da qualidade dos grãos obteve-se a umidade de equilíbrio higroscópico a partir da temperatura e umidade do ar intergranular monitoradas; a concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para determinação de forma indireta o consumo de matéria seca dos grãos, realizou-se o teste de condutividade elétrica e germinação dos grãos. Para prever precocemente as alterações físicas da massa de grãos utilizaram-se algoritmos Machine Learning e regressão linear. Os modelos testados foram: redes neurais artificiais (RNA), regressão linear (LR), algoritmo M5P, árvore de poda com erro reduzido (REPTree), floresta aleatória (RF), máquina de vetor suporte (SVM). Entre os resultados observou-se que a elevação dos parâmetros temperatura, umidade relativa do ar acelerou a atividade metabólica dos grãos e intensificou a respiração da massa de grãos, provocando consumo de matéria seca e alterações na qualidade física dos grãos de milho. O sistema de monitoramento com sensores para medição em tempo real da temperatura, umidade relativa e concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na massa de grãos de milho obteve resultados satisfatórios, as quais a sonda foi validada com diâmetro de furo 6,5 mm e altura de perfuração de 225 mm. O monitoramento em tempo real das variáveis determinou de forma indireta e precocemente as alterações de qualidade física dos grãos ao longo do transporte, confirmadas pelas análises físicas de condutividade elétrica e germinação. No período de 2 horas as variáveis monitoradas indicaram indiretamente as alterações físicas que ocorreram na massa de grãos. A condição de 16% de teor de água do milho e a posição de superior do perfil da massa de grãos sofreram as maiores alterações física de qualidade, principalmente quanto à perda de matéria seca, em função da elevada umidade de equilíbrio higroscópico e respiração da massa de grãos. O monitoramento da massa de grãos de milho em tempo real e a aplicação de algoritmos de Machine Learning predisseram as perdas quantitativas e qualitativas de grãos de milho no transporte. Todos os modelos de Machine Learning, com exceção do algoritmo máquina de vetor suporte obtiveram bons resultados, entretanto, a regressão linear múltipla alcançou os melhores ajustes, sendo indicado para a predição de perdas de grãos no transporte de milho.

**Palavras-chave:** Biosensores. Fatores bióticos. Inteligência artificial. Monitoramento de grãos. Pós-colheita. Transferência de grãos.



## ABSTRACT

### EARLY DETECTION AND PREDICTION OF DRY MATTER LOSS AND QUALITY OF CORN GRAINS IN REAL TIME DURING TRANSPORT

Author: Camila Fontoura Nunes  
Adviser: Prof. Dr. Paulo Carteri Coradi

Taking into account that the transport of grains can be carried out over long distances and that the mass of grains during transport, many times, has high contents of water, there may be risks of heat and moisture transfer and heating of the mass of grains, proving quanti-qualitative losses. Thus, this study aimed to validate a probe system for monitoring temperature, relative humidity and diffusion of the concentration of carbon dioxide in the mass of corn grains, in real time, during transport, as a function of different initial water contents (12, 16 and 25% w.b.), to detect early dry matter losses and predict possible changes in the physical quality of the grains. Portable equipment was developed to monitor the grain mass during road transport. The equipment consists of an Arduino Mega 2560 microcontroller as a control core. The system's hardware included three digital sensors to detect air temperature and relative humidity, a non-destructive infrared sensor to detect CO<sub>2</sub> concentration, real-time clock modules and a micro-SD card. The output data from the digital sensor, infrared sensor and modules were connected to the I/O communication terminals of the microcontroller which were responsible for physical communication, component integration and data calculation. The temperature and relative humidity sensors were fixed at three ends of a threaded bar and the CO<sub>2</sub> sensor was fixed in the central part. The real-time clock module and the micro-SD card were packaged in a plastic back box. The software used on the Arduino board was programmed based on the C++ programming language, with most of the libraries provided by the platform. The Arduino IDE (Integrated Development Environment) was used to develop the embedded firmware for the Atmega 2560 microcontrollers. To monitor the mass of corn grains, simulating a transport condition, a box was experimentally made with plywood material. in the dimensions of (0.2 x 0.2 x 1.8 m). The probe was inserted into the grain mass profile to assess the detection level of temperature, relative air humidity and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in the grain mass. To define the hole diameter, the temperature, relative humidity and carbon dioxide sensors were placed in probes with different hole diameters (7.5, 7.0 and 6.5 mm), drilling height (470, 235 and 117.5 mm) and grain moistures contents (12.16 and 25%). The holes were made to allow the entry of air and facilitate the response of the sensors. In order to choose the diameter and drilling height of the probe that best fits, one of the requirements was that they meet the two analyzed moistures contents. The readings on the sensors were carried out until the values of temperature, relative humidity and carbon dioxide concentration stabilized. With the validation of the equipment, the definitive probe was made with a polyvinyl chloride tube with a diameter of 50 mm and a height of 1500 mm, with three perforated regions (upper, central and lower). A metallic grain sampler tube was developed to attach the probe. To evaluate the quality of the grains, the hygroscopic equilibrium moisture was obtained from the monitored intergranular air temperature and humidity; the concentration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) to indirectly determine the dry matter consumption of the grains, the electrical conductivity test and the germination of the

grains were carried out. To early predict physical changes in grain mass, Machine Learning and linear regression algorithms were used. The models tested were: artificial neural networks (ANN), linear regression (LR), M5P algorithm, reduced error pruning tree (REPTree), random forest (RF), and support vector machine (SVM). Among the results it was observed that the elevation of the parameters temperature, relative humidity of the air accelerated the metabolic activity of the grains and intensified the respiration of the grain mass, causing consumption of dry matter and alterations in the physical quality of the corn grains. The monitoring system with sensors for real-time measurement of temperature, relative humidity and concentration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in the mass of corn grains obtained satisfactory results, in which the probe was validated with a hole diameter of 6.5 mm and drilling height of 225 mm. The real-time monitoring of the variables indirectly and precociously determined the changes in the physical quality of the grains during transport, confirmed by the physical analyzes of electrical conductivity and germination. In the 2-hour period, the monitored variables indirectly indicated the physical changes that occurred in the grain mass. The condition of 16% of water content of the corn and the position of superior of the profile of the mass of grains suffered the biggest physical alterations of quality, mainly in the loss of dry matter, in function of the high equilibrium moisture content and respiration of the mass of grains. Real-time monitoring of corn grain mass and the application of Machine Learning algorithms predicted the quantitative and qualitative losses of corn grains in transport. All Machine Learning models, with the exception of the support vector machine algorithm, obtained good results, however, the multiple linear regression reached the best fits, being indicated for the prediction of grain losses in corn transport.

**Keywords:** Biosensors. Biotic factors. Artificial intelligence. Grain monitoring. Post-harvest. Grain transfer.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Diagrama de blocos sistema operacional de monitoramento (A); Conexão dos componentes ao microcontrolador por meio de cabos jumper (B), Parte estrutural da sonda para aplicação na massa de grãos (C): 1- tubo de cloreto de polivinila, 2 - orifícios para entrada de ar, 3 elementos de fixação, 4 - sensores DHT22, 5 - sensor MH-Z14, 6 – barra roscada e cabeamento de sustentação, 7- hardware do equipamento, 8- Vista interna da sonda, 9 – Sonda para aplicação na massa de grãos. Fluxograma da programação utilizada para o funcionamento do sistema de monitoramento (D).....29
- Figura 2 - Tubo amostrador de grãos (A): Representação do perfil da massa de grãos (posição superior, central e inferior) e do sistema de monitoramento (B); Representação do sistema de monitoramento e transporte de grãos (C). .....31
- Figura 3 - Temperatura e Umidade relativa do ar da massa de grãos de milho com teor de água de 12%, em tubo com perfurações de 6,5, 7,0 e 7,5 mm, em três diferentes alturas de perfuração. ....37
- Figura 4 - Temperatura e Umidade relativa do ar da massa de grãos de milho com teor de água de 16%, em tubo com perfurações de 6,5, 7,0 e 7,5 mm, em três diferentes alturas de perfuração. ....38
- Figura 5 - Temperatura e Umidade relativa do ar da massa de grãos de milho com teor de água de 25%, em tubo com perfurações de 6,5, 7,0 e 7,5 mm, em três diferentes alturas de perfuração. ....38
- Figura 6 - Concentração de CO<sub>2</sub> da massa de grãos de milho com teor de água de 12%, em tubo com perfurações de 6,5, 7,0 e 7,5 mm, e alturas de perfuração de 117,5, 235 e 470 mm. ....39
- Figura 7 - Concentração de CO<sub>2</sub> da massa de grãos de milho com teor de água de 16%, em tubo com perfurações de 6,5, 7,0 e 7,5 mm, e alturas de perfuração de 117,5, 235 e 470 mm. ....39

Figura 8 - Concentração de CO <sub>2</sub> da massa de grãos de milho com teor de água de 25%, em tubo com perfurações de 6,5, 7,0 e 7,5 mm, e alturas de perfuração de 117,5, 235 e 470 mm.....	40
Figura 9 - Monitoramento da temperatura do ar intergranular na massa de grãos de milho com teores de água 12% (b.u.) ao longo do tempo. ....	45
Figura 10 - Monitoramento da umidade relativa do ar intergranular na massa de grãos de milho com teores de água 12% (b.u.) ao longo do tempo. ....	46
Figura 11 - Monitoramento da umidade de equilíbrio higroscópico do ar intergranular e a massa de grãos de milho com teores de água 12% (b.u.) ao longo do tempo. ....	46
Figura 12 - Monitoramento da concentração de dióxido de carbono no ar intergranular da massa de grãos de milho com teores de água 12% (b.u.) ao longo do tempo.....	47
Figura 13 - Monitoramento da temperatura do ar intergranular na massa de grãos de milho com teores de água 16% (b.u.) ao longo do tempo. ....	49
Figura 14 - Monitoramento da umidade relativa do ar intergranular na massa de grãos de milho com teores de água 16% (b.u.) ao longo do tempo. ....	49
Figura 15 - Monitoramento da umidade de equilíbrio higroscópico do ar intergranular e a massa de grãos de milho com teores de água 16% (b.u.) ao longo do tempo. ....	50
Figura 16 - Monitoramento da concentração de dióxido de carbono no ar intergranular da massa de grãos de milho com teores de água 16% (b.u.) ao longo do tempo.....	50
Figura 17 - Monitoramento da perda de matéria seca da massa de grãos de milho com teores de água 16% (b.u.) ao longo do tempo. ....	51
Figura 18 - Avaliação de estrutura celular dos grãos de milho com teores de água 12 e 16% (b.u.), pelo teste de condutividade elétrica, ao longo do período de monitoramento. ....	53

Figura 19 - Avaliação do percentual de germinação dos grãos de milho com teores de água 12 e 16% (b.u.) ao longo do tempo. ....	53
Figura 20 - Análise das variáveis canônicas qualitativas dos grãos de milho. ....	55
Figura 21 - Análise de correlação de Pearson das variáveis qualitativas dos grãos de milho. ....	56
Figura 22 - Boxplot para as variáveis, coeficiente de correlação de Pearson (r) e erro médio absoluto (MAE) entre os valores observados e estimados de massa específica aparente em grãos de milho por diferentes modelos de aprendizagem de máquina e entradas. Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.....	56
Figura 23 - Boxplot para as variáveis, coeficiente de correlação de Pearson (r) e erro médio absoluto (MAE) entre os valores observados e estimados da condutividade elétrica em grãos de milho por diferentes modelos de aprendizagem de máquina e entradas.....	57
Figura 24 - Boxplot para as variáveis, coeficiente de correlação de Pearson (r) e erro médio absoluto (MAE) entre os valores observados e estimados da germinação em grão de milho por diferentes modelos de aprendizagem de máquina e entradas. Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.....	58
Figura 25 - Boxplot para as variáveis, coeficiente de correlação de Pearson (r) e erro médio absoluto (MAE) entre os valores observados e estimados da perda de matéria seca em grãos de milho por diferentes modelos de aprendizagem de máquina e entradas. Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de milho no Brasil safra 17/18 e 18/19 em milhões de toneladas.....	19
Tabela 2 - Principais causas de perdas no transporte de grãos. ....	21
Tabela 3 - Estatística multivariada em função dos teores de água iniciais dos grãos, posição/camada de grãos e tempo de monitoramento. ....	34
Tabela 4 - Equações de regressão polinomial do comportamento da temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%) e CO <sub>2</sub> (ppm) da massa de grãos de milho com teor de água de 12%, em tubo com diferentes diâmetros de furo e alturas de perfuração.....	41
Tabela 5 - Equações de regressão polinomial do comportamento da temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%) e CO <sub>2</sub> (ppm) da massa de grãos de milho com teor de água de 16%, em tubo com diferentes diâmetros de furo e alturas de perfuração.....	42
Tabela 6 - Equações de regressão polinomial do comportamento da temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%) e CO <sub>2</sub> (ppm) da massa de grãos de milho com teor de água de 25%, em tubo com diferentes diâmetros de furo e alturas de perfuração.....	43

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>2 OBJETIVO GERAL</b> .....	<b>17</b>
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
3.1 PRODUÇÃO E IMPORTÂNCIA DO MILHO .....	19
3.2 PÓS-COLHEITA DE GRÃOS.....	20
3.3 TRANSPORTE DE GRÃOS NA PÓS-COLHEITA.....	20
3.4 FATORES QUE INTERFEREM NA QUALIDADE DOS GRÃOS.....	22
3.5 TECNOLOGIAS PARA MONITORAMENTO E PREDIÇÃO DA QUALIDADE DE GRÃOS.....	24
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>28</b>
4.1 PROJETO DE HARDWARE E SOFTWARE .....	28
4.2 DEFINIÇÃO DO DIÂMETRO DE FURO DA SONDA .....	30
4.3 DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DA SONDA .....	30
4.4 MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DA QUALIDADE DA MASSA DE GRÃOS.....	31
4.5 ANÁLISES DE QUALIDADE DO MILHO.....	32
4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS MULTIVARIADAS.....	33
4.7 MODELOS DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINA.....	34
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>36</b>
5.1 VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DA MASSA DE GRÃOS DE MILHO .....	36
5.2 MONITORAMENTO DA MASSA DE GRÃOS DE MILHO NO TRANSPORTE... 44	
5.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DOS GRÃOS.....	51
5.4 ANÁLISES MULTIVARIADAS .....	54
5.5 MODELOS DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINA.....	56
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>60</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é o cereal mais produzido no mundo, sendo processada na indústria de diferentes formas, com finalidade a alimentação animal, humana ou para a produção de biocombustíveis. No Brasil, a produção de milho gira em torno de 100 milhões de toneladas ano (CONAB, 2021). Apesar da elevada produção de grãos, verifica-se que há grandes perdas nas etapas de pós-colheita devido a precariedade dos setores de transporte, instalações e manuseio das operações de recebimento, secagem e armazenamento de grãos.

Durante o transporte de grãos, estima-se que há perdas de 0,25% por toneladas de grãos transportados (CONAB, 2021). As perdas no transporte rodoviário ocorrem devido às estradas precárias, velocidade do veículo, caminhões com carrocerias deterioradas, entre outros (Pereira et al., 2019). Além disto, uma vez os grãos colhidos, eles continuam biologicamente ativos e dependendo das condições em que se encontram podem desencadear uma série de reações metabólicas, ocasionando perdas tanto quantitativas como qualitativas.

Dentre os parâmetros mais relevantes que interferem na qualidade dos grãos na pós-colheita estão os teores de água dos grãos, a temperatura e a umidade relativa do ambiente, bem como a temperatura e a umidade relativa do ar intergranular. A elevação destes parâmetros pode aumentar a atividade metabólica dos grãos, propiciando perdas de matéria seca, proliferação de insetos, infecção por fungos e alterações na qualidade físico-química dos grãos.

Levando em consideração que o transporte de grãos no Brasil é realizado a longas distâncias, e que a massa de grãos transportada, muitas vezes encontra-se com elevados teores de água e impurezas, os riscos ao longo transporte com transferência de calor e umidade, migração de umidade e aquecimento da massa de grãos são elevados. A elevação desses parâmetros pode acelerar a atividade metabólica dos grãos e intensificar a respiração da massa de grãos, podendo provocar consumo de matéria e alterações na qualidade física, físico-química e microbiológica da massa de grãos.

Muitas vezes, as alterações da qualidade ao longo dos processos pós-colheita são provocados pela variação dessas variáveis ao longo do transporte. Para evitar esses problemas no transporte e possíveis fatores potenciais de alterações nos processos seguintes de pós-colheita, torna-se importante realizar o monitoramento



em tempo real da temperatura e umidade relativa do ar intergranular, para estimar a umidade de equilíbrio higroscópico, bem como, monitorar os níveis de dióxido de carbono para avaliar a intensidade respiratória da massa de grãos ao longo do tempo de transporte. A partir dessas informações em tempo real é possível detectar precocemente e predir as alterações na qualidade dos grãos.

Vários trabalhos sobre perdas quantitativas e qualitativas na pós-colheita vêm sendo publicados há vários anos (HUANG et al., 2013; LLELEJI e MAIER et al., 2006; JIAN et al., 2014; RODRIGUEZ, 2004; ZIEGLER et al., 2016 e ELIAS et al., 2021), entretanto, são poucos que abordam as perdas qualitativas decorrentes da atividade metabólica no processo de transporte, como possível influenciador para o desencadeamento e intensificação das perdas ao longo das operações seguintes de pós-colheita.

## 1.1 HIPOTESE

O monitoramento da massa de grãos de milho, em tempo real ao longo do transporte e a aplicação de algoritmos preditivos poderão auxiliar na detecção precoce e predição de possíveis perdas quantitativas e qualitativas de grãos de milho no transporte?

## 2 OBJETIVO GERAL

Sendo assim, este estudo teve como objetivo validar um sistema de monitoramento de temperatura, umidade relativa e da concentração de dióxido de carbono na massa de grãos de milho em tempo real, durante o transporte, em função de diferentes teores de água iniciais, para detectar precocemente perdas de matéria seca e predir possíveis alterações de qualidade física dos grãos.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Validar um sistema de sonda e calador com sensores encapsulados para realização do monitoramento da temperatura, umidade relativa e da concentração de dióxido de carbono na massa de grãos de milho, em tempo real, ao longo do transporte.

Detectar precocemente e prever alterações da qualidade física dos grãos ao longo do transporte através de medições em tempo real de variáveis indiretas da qualidade da massa de grãos e aplicações de algoritmos de Machine Learning.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 PRODUÇÃO E IMPORTÂNCIA DO MILHO

O milho é um produto fundamental para a agricultura brasileira, cultivado em todas as regiões do país, em mais de dois milhões de estabelecimentos agropecuários. Nas últimas décadas, a cultura passou por transformações profundas, destacando-se sua redução como cultura de subsistência de pequenos produtores e o aumento do seu papel em uma agricultura comercial eficiente, com deslocamento geográfico e temporal da produção (EMBRAPA, 2019).

Observando um incremento de 82% na produção comparando a safra de 2000/01 para a safra de 2018/19, por causa principalmente do uso como ração animal para a produção de frangos e suínos (EMBRAPA, 2019). A produção desta cultura concentra-se em poucos países, sendo os Estados Unidos o maior produtor mundial, seguido da China e do Brasil, que juntamente representam os três maiores países produtores sendo responsáveis por 59% da produção mundial (USDA, 2019).

A safra de milho no Brasil ocorre em duas épocas, sendo primeira e segunda safra que é mais conhecida como safrinha e possui maior área de produção. Na safra de 18/19 foi verificado um aumento na produção de 19,3% em comparação com a safra de 17/18 (Tabela 1), sendo um total de 99,9 milhões de toneladas contabilizando as duas safras, onde ocorreu 23,2 e 76,7 milhões de toneladas respectivamente na primeira e segunda safra, tendo uma área total plantada de 17495,4 ha e uma produtividade média de 5,715 kg.ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2019).

Tabela 1 - Produção de milho no Brasil safra 17/18 e 18/19 em milhões de toneladas.

Safra	17/18	18/19
1ª safra	26,8	26,2
2ª safra	53,8	73,7
Total	80,6	99,9

Fonte: Adaptada de Conab (2019).

### 3.2 PÓS-COLHEITA DE GRÃOS

A pós-colheita de produtos vegetais é um conjunto de processos que se inicia logo após a colheita e se estende até o consumo do produto final. Este conjunto tem como principal objetivo tentar minimizar ao máximo a perda de produtos. Tanto quantitativamente quanto qualitativamente, mantendo assim o seu valor comercial. Sendo assim, é importante que se conheçam e se utilizem práticas adequadas de manuseio durante as fases de colheita, transporte, pré-processamento, beneficiamento, armazenamento, comercialização e consumo.

### 3.3 TRANSPORTE DE GRÃOS NA PÓS-COLHEITA

Nas fazendas, as perdas são decorrentes a capacidade de armazenagem ser menor que a capacidade de produção. Muitas vezes, a fazenda não tem local apropriado para armazenagem, ocorrendo à necessidade de escoar a produção para evitar perdas com molhadura, pragas e roedores, bem como a dificuldade em movimentar a produção para fora de fazenda, utilizando-se carrocerias não apropriadas para a carga, e volume de excesso no carregamento (RIPOLL, 2010; PATINO et al., 2013).

Durante a movimentação da fazenda aos armazéns, as perdas de grãos estão espalhadas ao longo das rodovias, proveniente da escolha do modal, a falta de conservação das rodovias, a falta de conexão entre os modais rodoviário, ferroviário e hidroviário, a baixa oferta de outro tipo de modal para o transporte da carga, a falta de investimento em carrocerias cerealistas, perdas durante a armazenagem, longas distâncias para os locais de armazenagem, falta de manutenção nos armazéns, além do tempo decorrente do produto em condições extremas de alto teor de umidade e temperatura por períodos longos, antes de passarem pelo processo de secagem (MORCELLI, 2011; CANEPPELE e SARDINHA, 2014).

A atividade de transporte de produtos agrícolas consiste inicialmente do deslocamento da matéria prima desde as fazendas até as unidades de armazenagem, a seguir, o produto eventualmente processado é transportado até as centrais de armazenagem ou pontos de comercialização das regiões consumidoras. Portanto, percebe-se que grande parte desses produtos são manuseados diversas vezes, o que pode facilitar a incidência de alterações qualitativas no estado inicial da

carga. Além disso, para o caso de produtos mais perecíveis, o tempo excessivo em trânsito, normalmente despendido para cobrir longas distâncias com o emprego de meios de transporte convencionais, favorece a ocorrência de perdas. Na tabela 2, são apresentadas algumas das causas que ocasionam as perdas no transporte de grãos e exemplo das mesmas.

Tabela 2 - Principais causas de perdas no transporte de grãos.

Causas	Exemplos
Impacto vertical	Queda no descarregamento de caminhão
Impacto horizontal	Engate de comboio ferroviário
Vibração	Vibração do motor e da transmissão de caminhão
Compressão estática	Compressão em unidades de armazenamento
Compressão, transiente	Compressão em esteiras de transporte
Deformação	Apoio em elevadores desnivelados
Perfuração	Queda no carregamento de veículo
Temperatura alta	Exposição ao sol
Água líquida	Exposição à chuva
Água vapor	Umidade da atmosfera
Biológica	Insetos, roedores e mofo
Humana	Furto e inspeção

Fonte: New et al. (1978).

Outro fator que ocasionam perdas é devido a necessidade de transporte imediato a colheita, onde não se tem disponibilidade de secador na própria fazenda produtora de grãos, então os grãos são expostos muitas vezes as variações do clima, temperaturas elevadas e umidade relativa em índices maiores de 70%, por longos períodos ou a quase um dia inteiro em níveis de umidade no início da colheita durante esses curtos períodos podem levar a perdas de qualidade imediatas após a colheita (OLSEN et al., 2013).

Vários trabalhos sobre perdas quantitativas vêm sendo publicados nos últimos anos. Pereira et al. (2019) estabeleceram um índice de perda percentual e avaliaram perdas quantitativas durante o transporte de grãos a granel de milho. Os autores avaliaram as perdas de grãos de milho nas estradas de transporte com base no

peso das cargas. Os autores obtiveram o peso de origem, peso de destino, local de origem e local de destino, e por diferença obteve-se a quantidade de grãos perdidos no transporte e durante a quilometragem percorrida dos caminhões. Por meio desses dados foi possível obter três índices de perdas, um em Kg/Km (quilograma por quilômetro rodado), outro em Kg/t (quilogramas por tonelada transportada), e também um índice de perda em porcentagem de grãos transportados. O caminhão “Bitrem” (7 eixos) foi utilizado como base para o cálculo das perdas, já que este tipo de transporte é o mais utilizado nas rodovias (39% do transporte). Segundos os autores, as perdas totais foram de 1.808.951 kg, com média de 45,63 kg de perda na viagem. A perda por km foi em média de 0,072 kg. O índice de perda percentual foi de 0,1025%. Com base nos dados obtidos pode-se afirmar que é possível adotar taxas de perdas percentuais inferiores a 0,25% nos contratos de comercialização de grãos. Os autores recomendam perdas a adoção de perdas percentuais de grãos de milho no transporte rodoviário de 0,10%. Outros autores comentam que estes percentuais podem alcançar até 0,25%.

No entanto, no transporte, não são só perdas quantitativas que ocorrem, os grãos permanecem biologicamente ativos, e dependendo das condições de teor de umidade dos grãos, temperatura e umidade relativa do ambiente que se encontram, podem ocasionar um aumento da respiração dos mesmos, gerando não só perdas quantitativas, como qualitativas.

Assim, algumas alternativas de monitoramento, vem sendo desenvolvidas para a avaliação qualitativa da massa de grãos. Danao et al. (2015), Olsen et al. (2013), Wilhelmi (2014) desenvolveram estudos com objetivo de fabricar um aparato experimental para monitorar os parâmetros de temperatura, umidade relativa e CO<sub>2</sub> durante o transporte de grãos, analisando a condição interna da massa de grãos por meio de sensores. Sendo assim, se faz necessário saber como estes fatores interferem na qualidade dos grãos.

### 3.4 FATORES QUE INTERFEREM NA QUALIDADE DOS GRÃOS

A massa de grãos é constantemente submetida a fatores externos, os quais podem ser físicos, como temperatura e umidade, químicos, como fornecimento de oxigênio, e biológicos, como bactérias, fungos, insetos e roedores (REGINATO et al, 2015).

O processo de deterioração dos grãos na pós-colheita vai ocorrer, porém, dependendo das condições e das características dos grãos, essa deterioração pode ser minimizada (CARDOSO, 2012). Os fatores que mais interferem e que requerem uma maior atenção são: temperatura, umidade, concentração de dióxido de carbono e oxigênio no ar intersticial, presença de microrganismos, insetos, ácaros, condições do clima e a estrutura do grão (FARONI, 2005).

Os grãos, depois de colhidos continuam vivos e, portanto, respirando. Para a realização desse processo os grãos utilizam o oxigênio existente nos espaços intergranulares, sendo liberado, como produto dessa reação, gás carbônico (CO<sub>2</sub>), água (H<sub>2</sub>O) e calor. Segundo Park et al. (2012), vários fatores interferem na qualidade dos grãos, como umidade e temperatura dos grãos, temperatura e umidade do ar, presença de grãos quebrados, matérias estranhas e impurezas, ataque de insetos, ácaros e microrganismos, manejo tecnológico e tempo de armazenamento. O processo respiratório é acompanhado de um comprometimento de substâncias nutritivas do produto, sendo afetado, principalmente, pela temperatura, teor de umidade dos grãos e pelos fungos associados à massa.

A maior produção de CO<sub>2</sub> pode ser relacionada também com uma maior perda de matéria seca, principalmente em grãos que estão em condições de alto teor de umidade e em temperaturas elevadas, pois com a elevação da temperatura ocorre um aumento da atividade respiratória dos grãos e dos organismos vivos que compõem o sistema (SANTOS et al., 2012).

Outro fator que varia dependendo das condições do ambiente em que a massa dos grãos se encontra é a umidade de equilíbrio higroscópico, sendo que quando a pressão de vapor do grão é maior que a do ar circundante, ocorre o fenômeno de dessorção havendo transferência de vapor de água para o ar reduzindo, desta forma, a umidade dos grãos (BROOKER et al., 1992). Entretanto, vários fatores interferem no equilíbrio higroscópico de acordo com Carneiro et al. (2005), como composição química dos grãos, integridade física, estado sanitário, gradientes termo hídricos e operações de pós-colheita, dentre os quais a secagem e o armazenamento são as mais importantes.

A liberação de CO<sub>2</sub> 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 a ataques de insetos, pássaros ou roedores; movimentação do produto; tipo de

estrutura armazenadora, entre outros fatores. Levando em conta experiências práticas em unidades de armazenamento, foi estabelecido, no Brasil, um índice oficial de quebra técnica de 0,15% por mês de armazenamento (BAUDET e VILLELA, 2000).

O conceito de umidade de equilíbrio é importante no estudo da secagem e armazenagem dos grãos, uma vez que a umidade de equilíbrio determina o menor grau de umidade (condições limites) no qual o grão pode ser secado sob determinadas condições de secagem, e também porque os grãos armazenados em condições adequadas de umidade poderão mudar, perdendo ou recebendo umidade durante o armazenamento; portanto, umedecendo ou super-secando, o que causará prejuízos ao produto e à sua comercialização (MILMAN, 2002).

A necessidade do conhecimento das relações entre o produto, a umidade relativa do ar e a temperatura pode estar diretamente relacionada com a sua qualidade (SMANIOTTO, 2012).

### 3.5 TECNOLOGIAS PARA MONITORAMENTO E PREDIÇÃO DA QUALIDADE DE GRÃOS

Para a conservação de grãos durante as etapas pós-colheita, a Internet das Coisas (IoT) pode ajudar a melhorar os métodos de monitoramento e rastreabilidade de produtos alimentícios. Kodali et al. (2020) descreveram um sistema que consiste em um microcontrolador e vários sensores que podem coletar informações de temperatura, umidade, CO<sub>2</sub> para avaliação indireta da qualidade dos alimentos e enviar essas informações para um operador responsável, para garantir que os produtos sejam mantidos em armazenamento seguros. O dispositivo de monitoramento também modera os níveis de temperatura e o teor de água dos grãos usando ventiladores e unidades de refrigeração controladas pelo sistema IoT. Qualquer infestação de insetos ou presença de fungos, por exemplo, é notificada ao gestor para que sejam tomadas providências (KODALI et al., 2020).

Sindwani et al. (2020) também indicaram o uso de um sistema de monitoramento em tempo real baseado no sistema IoT, para obter parâmetros de armazenamento, como temperatura do ar, umidade relativa e concentração de CO<sub>2</sub>. Os autores utilizaram um dispositivo de hardware que contém dois sensores e uma bateria para alimentação. Os sensores foram utilizados para detectar a temperatura,



umidade relativa e CO<sub>2</sub>. Um portal online foi criado para analisar e coletar dados em tempo real dos sensores. Este portal foi facilmente integrado ao portal digital já presente na maioria das unidades de armazenamento.

Além disso, Parvin et al. (2018) estudaram um sistema inteligente baseado em um conjunto de sensores otimizados para o monitoramento eficiente de grãos armazenados. Esses autores usaram um sistema ciber-físico (CPS), que é como a Internet das Coisas (IoT), mas fornece mecanismos inteligentes com maior coordenação e controle entre a comunicação física e os elementos computacionais. Uma aplicação típica de CPS é o monitoramento de aspectos particulares, usando muitas redes de sensores sem fio e comunicar as informações processadas a um nó central. De acordo com Parvin et al. (2018), a função do monitoramento pode ser realizada por meio da detecção contínua de vários parâmetros, como a temperatura e umidade relativa do ar intersticial dentro do ambiente de armazenamento de grãos por uma rede de sensores sem fio e pela coleta, processamento e exibição de dados eficientes.

Uma vez que os dados são coletados, a unidade de gerenciamento e controle é usada para prever a distribuição da temperatura e do teor de água dos grãos, bem como, a temperatura e a umidade do ar intersticial no armazenamento. Isso ajudará a reduzir efetivamente a temperatura e o teor de água dos grãos para garantir sua qualidade. Quando a temperatura e a umidade relativa do ar, no compartimento de armazenamento são superiores aos valores limites predefinidos, o nó sensor coordenador envia o comando ao nó sensor de controle através da porta serial. O nó de controle então executa as ações necessárias, como ligar o ventilador de refrigeração ou aeração para reduzir a temperatura e a umidade relativa e, assim, manter a qualidade e segurança dos grãos armazenados (PARVIN et al., 2018).

Uma abordagem tecnológica para controle inteligente foi estudada para armazenamento de grãos. O monitoramento em tempo real baseado no uso de sensoriamento inteligente do ambiente em que a massa de grãos está armazenada, onde os dispositivos comunicam e transmitem os dados ambientais para um servidor web que os interpreta e analisa com base em ferramentas de Machine Learning, verifica enorme potencial de controle qualidade do produto durante o tempo de armazenamento (ABDIPOUR et al., 2018; PATRÍCIO e RIEDER, 2018). Liu et al. (2017) realizaram uma análise de perdas durante o armazenamento de grãos com base em um algoritmo de árvore de decisão. O modelo de algoritmo de árvore de

decisão correspondente pode ser usado para lidar com as diferentes condições de armazenamento de grãos e, assim, prever perdas devido ao ataque de insetos ou outros microrganismos associados.

Recentemente Nyabako et al. (2020) estudaram, por meio de uma abordagem de aprendizado de máquina, uma previsão da população de insetos e os danos associados em uma massa de grãos. A inserção dos dados no algoritmo foi realizada por meio da coleta de informações em unidades de armazenamento e correlacionadas com as condições meteorológicas de cada local. A partir desses dados de entrada, foram desenvolvidos modelos para prever a infestação de insetos e os danos que podem ser causados em grãos armazenados usando algoritmos de seleção de parâmetros e algoritmos de aprendizado de decisão de árvore.

Jian et al. (2014) desenvolveram modelos matemáticos para prever as taxas de germinação de canola armazenada sob condições controladas e de campo. A hipótese na base de seus modelos era que a germinação de canola armazenada poderia ser influenciada pela temperatura, teor de umidade e tempo de armazenamento. Seus modelos explicaram mais de 96% da variação nas taxas de germinação observadas em sementes de canola armazenadas com 10% de umidade. A germinação da canola armazenada foi influenciada pelo tempo de armazenamento e pelas interações entre temperatura, umidade e tempo de armazenamento.

Alguns estudos avaliaram diferentes modelos matemáticos que predizem a qualidade de grãos armazenados em silos bolsa. Barreto et al. (2017) descreveram um modelo bidimensional de elementos finitos que prevê a distribuição de temperatura e teor de umidade devido à variação climática sazonal da soja armazenada em silos de sacos. O modelo também incluiu a respiração da massa de grãos e calculou a concentração de dióxido de carbono e oxigênio durante o armazenamento. Os autores encontraram uma diferença de temperatura de 0,5 a 1°C entre as camadas inferior e intermediária e uma diferença de 1,5°C entre as camadas superiores. O grão na camada superior teve um aumento de teor de umidade de 0,4%, enquanto os níveis de água contidos nas camadas intermediária e inferior do saco permaneceram os mesmos. Barreto et al. (2017) recomendaram um valor de referência de concentração de CO<sub>2</sub> de 3% como limite ao armazenar soja com teor de umidade entre 13 e 15%. Enquanto o modelo descrito por Taher et al. (2021) teve como objetivo prever a perda de soja durante o armazenamento

monitorando a concentração de CO<sub>2</sub> ao longo do período de armazenamento, obtendo uma correlação de 73%.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

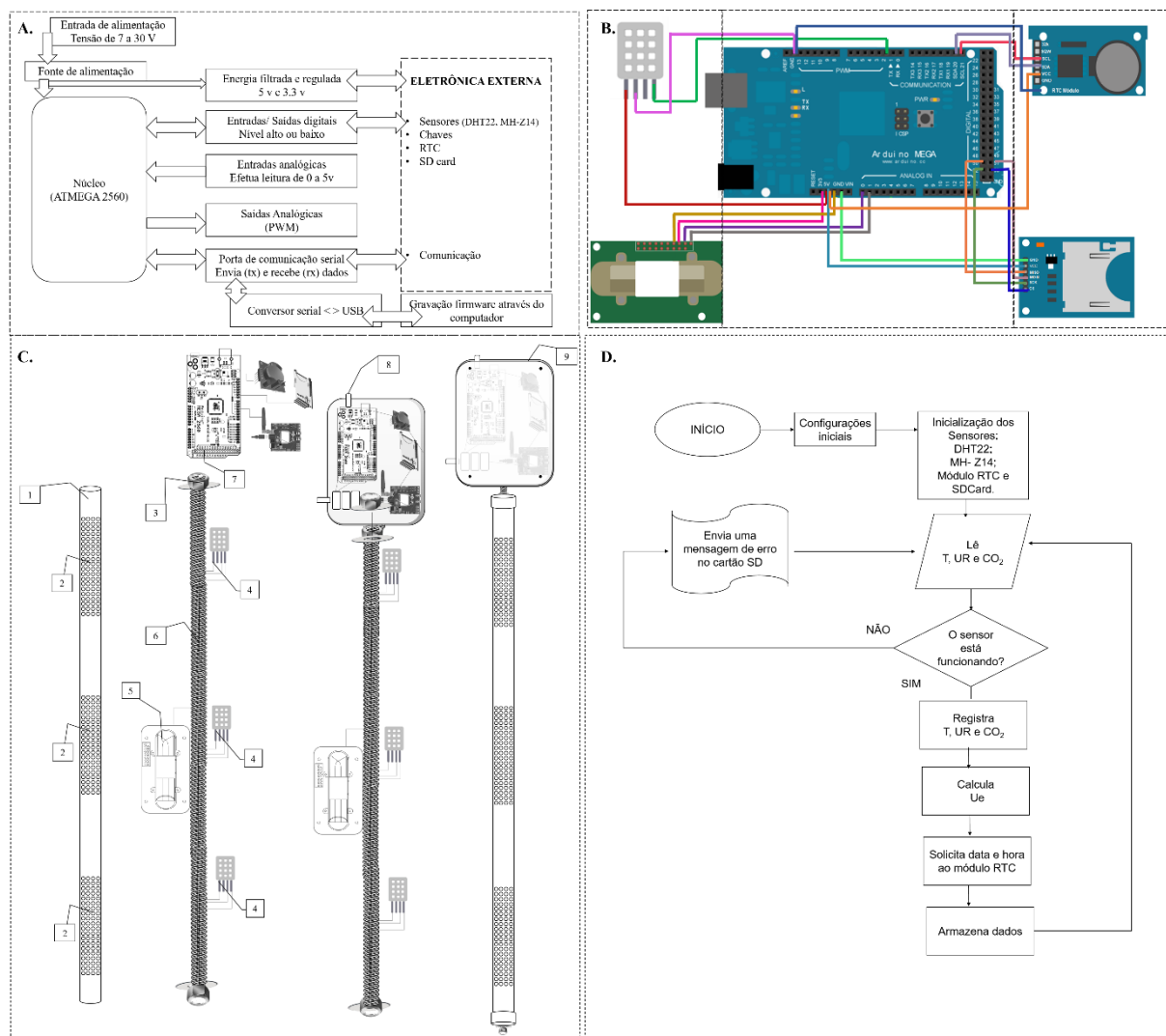
### 4.1 PROJETO DE HARDWARE E SOFTWARE

Para o monitoramento da massa de grãos durante o transporte rodoviário, foi desenvolvido um equipamento portátil. O equipamento constitui-se em um microcontrolador Arduino Mega 2560 (modelo Mega 2560, Arduino LLC, Itália) como núcleo de controle. O hardware do sistema inclui três sensores digitais para detectar a temperatura e umidade relativa do ar (modelo DHT22, Aosong Electronics, Guangzhou, China), um sensor infravermelho não destrutivo para detectar a concentração de CO<sub>2</sub> (modelo MHZ-14, Winsen, China), módulos de relógio em tempo real (modelo DS3231, flip-flop, China) e um cartão micro-SD (modelo Greatzt cartão micro SD, importação, China). O diagrama de blocos do sistema de controle é mostrado na Figura 1A. Os dados de saída do sensor digital, sensor infravermelhos e módulos são conectados aos terminais de comunicação de I / O do microcontrolador que são responsáveis pela comunicação física, integração de componentes e cálculo de dados. O diagrama de conexão elétrica de cada componente via cabos jumper é mostrado na Figura 1B.

Os sensores de temperatura e umidade relativa (modelo DHT22, Aosong Electronics, Guangzhou, China) foram fixados em três extremidades de uma barra roscada e o sensor de CO<sub>2</sub> (modelo MHZ-14, Winsen, China) foi fixado na parte central. O módulo de relógio em tempo real (modelo DS3231, flip-flop, China) e o cartão micro-SD (modelo Greatzt cartão micro-SD, Import, China) foram acondicionados em uma caixa plástica patola. A Figura 1C mostra a estrutura do equipamento com os sensores dispostos ao longo da barra roscada e protegidos por uma sonda de policloreto de vinila. O equipamento possui alimentação própria com três baterias dispostas em série.

O software utilizado na placa Arduino foi programado com base na linguagem de programação C++, sendo a maioria das bibliotecas fornecida pela plataforma. O IDE (Integrated Development Environment) do Arduino foi usado para desenvolver o firmware embarcados para os microcontroladores Atmega 2560. O fluxograma mostrado na Figura 1D refere-se ao programa de operação do equipamento que é utilizado para monitorar a massa de grãos durante o transporte rodoviário.

Figura 1 - Diagrama de blocos sistema operacional de monitoramento (A); Conexão dos componentes ao microcontrolador por meio de cabos jumper (B), Parte estrutural da sonda para aplicação na massa de grãos (C): 1- tubo de cloreto de polivinila, 2 - orifícios para entrada de ar, 3 elementos de fixação, 4 - sensores DHT22, 5 - sensor MH-Z14, 6 – barra roscada e cabeamento de sustentação, 7- hardware do equipamento, 8- Vista interna da sonda, 9 – Sonda para aplicação na massa de grãos. Fluxograma da programação utilizada para o funcionamento do sistema de monitoramento (D).



Fonte: Adaptado de JAQUES (2021).

Para garantir a mesma condição das avaliações, os sensores de temperatura e umidade relativa (modelo DHT22, Aosong Electronics, Guangzhou, China) foram aquecidos a uma temperatura de 24 °C. Com temperatura inicial de 24 °C, os sensores operaram por 40 min e sua medição foi registrada a cada minuto. Usando o sensor infravermelho (modelo MHZ-14, Winsen, China), a calibração inicial foi realizada no próprio Arduino e a concentração de CO<sub>2</sub> foi registrada.

## 4.2 DEFINIÇÃO DO DIÂMETRO DE FURO DA SONDA

Para a definição do diâmetro de furo, os sensores de temperatura, umidade relativa e dióxido de carbono foram acondicionados em sondas com os diferentes diâmetros de furos (7,5, 7,0 e 6,5 mm), altura de perfuração (470, 235 e 117,5 mm) e teores de água dos grãos (12 e 16%). Os furos foram confeccionados para permitir a entrada de ar e facilitar a resposta dos sensores. Para a escolha do diâmetro e altura de perfuração da sonda que melhor se adeque, um dos requisitos foi que os mesmos atendam os dois teores de água analisados.

Depois de definir o diâmetro do furo e altura de perfuração que melhor se adequou aos grãos de milho, nos diferentes teores de água, realizou-se a validação do equipamento em laboratório. Para isto foram acondicionados na sonda os sensores de temperatura e umidade relativa na posição inferior, central e superior da sonda e um sensor de dióxido de carbono na posição central.

Para realizar o monitoramento das variáveis acima citadas na massa de grãos, a sonda com os sensores foi inserida em uma caixa construída com material de compensado nas dimensões de (0,2 x 0,2 x 1,8 m), simulando-se o perfil de uma carga de grãos de um sistema de transporte. As leituras nos sensores foram realizadas até os valores de temperatura, umidade relativa e concentração de dióxido de carbono se estabilizar.

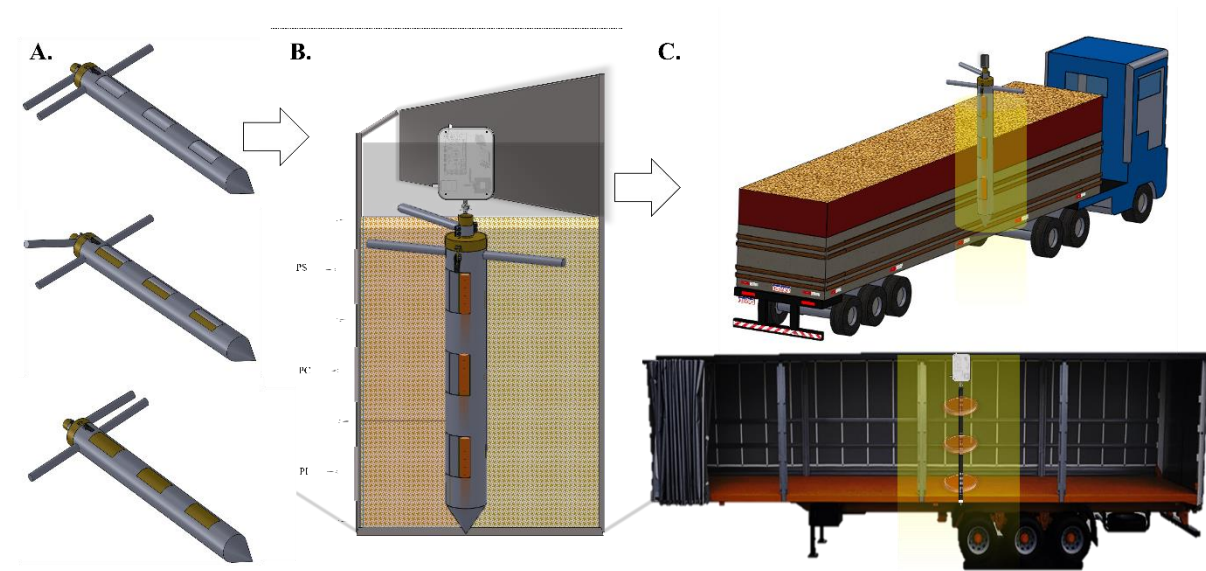
## 4.3 DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DA SONDA

A sonda foi construída usando um tubo de cloreto de polivinila com um diâmetro de 50 mm e uma altura de 1500 mm, com três regiões perfuradas (superior, central e inferior), com orifícios com diâmetro de 6,5 mm e altura de perfuração de 235 mm. A definição do diâmetro dos orifícios e a altura da perfuração da sonda foram dadas em função do menor tempo de resposta que os sensores tiveram para as variáveis medidas (temperatura, umidade relativa e CO<sub>2</sub>) no ar intergranular. A Figura 1C mostra a distribuição dos orifícios na parte superior, central e inferior da sonda.

Um tubo amostrador de grãos metálicos foi desenvolvido para acoplar a sonda (Figura 2A). O tubo consistia em dois tubos sobrepostos, com uma ponta na extremidade inferior e um braço giratório na extremidade superior. Isso possibilitou a

proteção da sonda e aumentou a precisão da leitura intergranular dos grãos. Além disso, permitiu a coleta de amostras nas diferentes camadas do perfil do lote de grãos. O tubo continha aberturas / células na parte superior, central e inferior ao longo de seu comprimento, conforme mostrado na Figura 2B.

Figura 2 - Tubo amostrador de grãos (A): Representação do perfil da massa de grãos (posição superior, central e inferior) e do sistema de monitoramento (B); Representação do sistema de monitoramento e transporte de grãos (C).



Fonte: Adaptado de JAQUES (2021)

#### 4.4 MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DA QUALIDADE DA MASSA DE GRÃOS

O amostrador metálico e a sonda com os sensores estavam dentro da massa de grãos. As variáveis temperatura, umidade relativa e gás carbônico na massa do grão intergranular foram monitorados em tempo real, a intervalos de 1,87 segundos por resposta, por vinte e quatro horas, simulando as condições de transporte (Figuras 2B-C). O enchimento de cada carga foi realizado com grãos com teores de água de 12 e 14% (b.u). As amostras foram coletadas nos tempos 0, 120, 480 e 1440 minutos de transporte, nas três posições (superior, central e inferior) da carga. A variação do equilíbrio higroscópico foi calculada usando a equação de Henderson modificada (Equação 1):

$$U_e = \frac{1}{100} \left[ \frac{\ln(1 - 0.01UR)}{-K(T + C)} \right]^{1/N} \quad (1)$$

em que,

$U_e$  - umidade de equilíbrio higroscópico (%)

$UR$  - umidade relativa (%)

$T$  - temperatura (°C)

$K, C, N$  - parâmetros ( $K = 0,000305$ ,  $C = 134,136$ ,  $N = 1,2164$ )

Para determinar a perda de matéria seca (PMS) ao longo do tempo, um modelo de estimativa foi usado com referência à concentração de  $CO_2$  (Equação 2):

$$PMS = 100(CO_2 - O_2) \left( \frac{\varepsilon p U}{2\rho(1-U)RT} \right) \quad (2)$$

em que,

$PMS$  - Perda de matéria seca (%)

$O_2$  - concentração de oxigênio comumente encontrada no ar (21%)

$CO_2$  - concentração de dióxido de carbono medida na massa de grãos (%)

$\varepsilon$  - porosidade intergranular (%)

$P$  - pressão atmosférica local (96 kPa)

$W_g$  - massa molar de glicose ( $180 \text{ kg kmol}^{-1}$ )

$\rho$  - massa específica aparente dos grãos ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$U$  - teor de água dos grãos (decimal)

$R$  - constante dos gases perfeitos ( $8.314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )

$T$  - temperatura intergranular (K)

#### 4.5 ANÁLISES DE QUALIDADE DO MILHO

O teor de água foi determinado pelo método de estufa com circulação de ar à temperatura de  $105 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  por 24 h em quatro repetições (BRASIL, 2009). O método desenvolvido por Mohsenin (1986) foi utilizado para obter a massa específica aparente por meio da pesagem de uma massa de grãos colocada em um volume conhecido. Quatro repetições foram realizadas para cada tratamento. A condutividade elétrica foi determinada de acordo a metodologia do ISTA (2008).



Quatro repetições de 50 grãos para cada tratamento foram contadas e pesadas. As amostras foram colocadas em copos plásticos com 75 mL de água destilada e colocadas em câmara com temperatura controlada a 25 °C por 24 h. A condutividade elétrica foi obtida por meio de condutivímetro, e o resultado foi expresso em  $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$ . Foi realizado teste de germinação em quatro unidades experimentais com quatro subamostras de 50 grãos para cada tratamento. Os grãos foram colocados em papel germitest, que foi embebido em água destilada. A quantidade de água destilada foi 2,5 vezes a massa do substrato seco. Os rolos de papel foram armazenados em um germinador Mangelsdorf a 25 °C. As contagens foram realizadas no sétimo dia após a semeadura e os resultados foram expressos em porcentagem (BRASIL, 2009).

#### 4.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS MULTIVARIADAS

Primeiramente, uma análise de componentes principais foi realizada, utilizando algoritmo *k-means*, que agrupa tratamentos cujos centróides estão mais próximos até que não haja variação significativa na distância mínima de cada observação a cada um dos centróides. Em seguida, para verificar a inter-relação entre as variáveis e os tratamentos foi realizada uma análise de variáveis canônicas. Essa técnica é semelhante aos componentes principais, mas permite considerar a variação residual entre repetições do mesmo tratamento. Posteriormente, 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. Essas análises foram realizadas com auxílio do pacote “ggfortify” do aplicativo gratuito R e seguiram os procedimentos recomendados por (NALDI et al., 2011) (Tabela 3).

Tabela 3 - Estatística multivariada em função dos teores de água iniciais dos grãos, posição/camada de grãos e tempo de monitoramento.

Teor de água (%)	Posição	Tempo (min)	Clusters
12	Inferior	0	1
12	Inferior	60	2
12	Inferior	480	3
12	Inferior	1440	4
12	Central	0	5
12	Central	60	6
12	Central	480	7
12	Central	1440	8
12	Superior	0	9
12	Superior	60	10
12	Superior	480	11
12	Superior	1440	12
16	Inferior	0	13
16	Inferior	60	14
16	Inferior	480	15
16	Inferior	1440	16
16	Central	0	17
16	Central	60	18
16	Central	480	19
16	Central	1440	20
16	Superior	0	21
16	Superior	60	22
16	Superior	480	23
16	Superior	1440	24

#### 4.7 MODELOS DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINA

Os modelos testados foram: redes neurais artificiais (ANN), regressão linear múltipla (LR), algoritmo M5P, algoritmo REPTree, floresta aleatória (RF) e máquina de vetor suporte (SVM). A ANN testada consiste em uma camada oculta única formada por um número de neurônios que é igual ao número de atributos, mais o número de classes, todos divididos por 2 (EGMONT-PETERSEN et al., 2002).

O modelo LR foi utilizado como modelo controle. O modelo M5P é uma reconstrução do algoritmo M5 de Quinlan que se baseia na árvore de decisão convencional com a adição de uma função de regressão linear aos nós das folhas

(BLAIFI et al., 2018). O modelo M5P é uma adaptação do classificador C4.5 que pode ser usado em problemas de regressão com uma etapa de poda adicional baseada em uma estratégia de redução de erro. O REPTree utiliza a lógica da árvore de decisão e cria várias árvores em diferentes repetições. Em seguida, seleciona a melhor árvore utilizando o ganho de informação e realiza a poda de redução do erro como critério de divisão (KALMEGH, 2015). O modelo RF é capaz de produzir várias árvores de predição para o mesmo conjunto de dados e usar um esquema de votação entre todas essas árvores aprendidas para prever novos valores (BELGIU and DRĂGU, 2016).

A predição das variáveis massa específica aparente (ASM), condutividade elétrica (CE), germinação (GERM) e perda de matéria seca (LDM) de milho foi realizada pelos cinco modelos de aprendizado de máquina (ML) em uma validação cruzada estratificada aleatória de 10 vezes com 10 repetições (100 execuções para cada modelo). As variáveis de entrada foram: teor de água dos grãos, tempo de monitoramento, temperatura e umidade relativa do ar intergranular, umidade de equilíbrio higroscópico e concentração de dióxido de carbono. As estatísticas utilizadas para verificar a qualidade do ajuste foram: coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) entre os valores observados e os preditos por cada modelo e o erro médio absoluto (MAE) dos valores preditos em relação aos observados. As análises de aprendizagem de máquina foram realizadas com software Weka 3.9.4. utilizando a configuração padrão para todos os modelos testados (BOUCKAERT et al., 2010) em uma CPU Intel® Core™ i5 com 6 Gb de RAM.

Após a obtenção das estatísticas  $r$  e MAE foi realizada análise de variância considerando um delineamento inteiramente casualizado com 10 repetições (folds). As médias foram agrupadas pelo teste de Scott-knott a 5% de probabilidade. Foram construídos gráficos de barras para cada variável ( $r$  e MAE) considerando os modelos e inputs testados. Essas análises foram realizadas com software R (R CORE TEAM, 2018) com auxílio dos pacotes ExpDes.pt e ggplot2.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DA MASSA DE GRÃOS DE MILHO

Nas Figuras 3-8 estão representadas as curvas de temperatura, umidade relativa e difusão de CO<sub>2</sub> intergranular, monitorados em tempo real com uso de sensores, em função do diâmetro e altura de perfuração da sonda para grãos de milho com teores de água iniciais de 12, 16 e 25% (b.u.).

Observou-se que os comportamentos das curvas foram semelhantes dentro de cada variável monitorada. Após calibração dos sensores, no tempo zero, houve uma redução da temperatura e um aumento da umidade relativa e de CO<sub>2</sub> intergranular, com tendência a estabilização das curvas ao longo do tempo. Estes resultados demonstram coerência das variáveis monitoradas, bem como uma precisão e funcionalidade do sistema de monitoramento.

Entre as curvas, observou-se uma variação das variáveis monitoradas em função dos teores de água iniciais dos grãos, diâmetro e altura de perfuração da sonda, e tempo de monitoramento. Verificou-se uma diferença de aproximadamente 4 °C entre as curvas de temperatura, de 5% em umidade relativa e 500 ppm de CO<sub>2</sub> a partir da estabilização das curvas. As maiores variações de temperatura, umidade relativa e CO<sub>2</sub> ocorreram na massa de grãos com teores de água de 16 e 25%, ao longo do tempo de monitoramento. Os sensores de temperatura e umidade relativa do ar intergranular levaram cerca de 10 min para estabilizar-se, enquanto que, o sensor de CO<sub>2</sub> precisou de cerca de 5 min para atingir um equilíbrio no processo de difusão. Zhang et al. (2014) avaliaram a concentração de CO<sub>2</sub> em vários pontos da massa de grãos armazenados. Os autores verificaram que a concentração de CO<sub>2</sub> foi detectada com sensibilidade em uma distância horizontal de 2 m do ponto quente, e 1 m do ponto quente na direção vertical. Segundos os autores o método de detecção da concentração de CO<sub>2</sub> em múltiplos pontos fixos colaborou para quantificar de uma forma mais precisa a deterioração dos grãos.

Enquanto que, Huang et al. (2013) avaliaram o coeficiente de difusão efetivo do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) através da massa de grãos de milho a granel nas temperaturas de 10, 20 e 30 °C e teores de água dos grãos de 14,0, 18,8 e 22,2% (b.u.). os autores verificaram que a taxa de respiração do milho aumentou com o

aumento da temperatura e do teor de água dos grãos. Conforme a taxa de respiração aumentou, teve um efeito maior no padrão de difusão ao medir o coeficiente de difusão efetivo de  $\text{CO}_2$ . Os coeficientes de difusão efetivos de  $\text{CO}_2$  variaram entre  $3,10 \times 10^{-6}$  e  $3,93 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

Figura 3 - Temperatura e Umidade relativa do ar da massa de grãos de milho com teor de água de 12%, em tubo com perfurações de 6,5, 7,0 e 7,5 mm, em três diferentes alturas de perfuração.

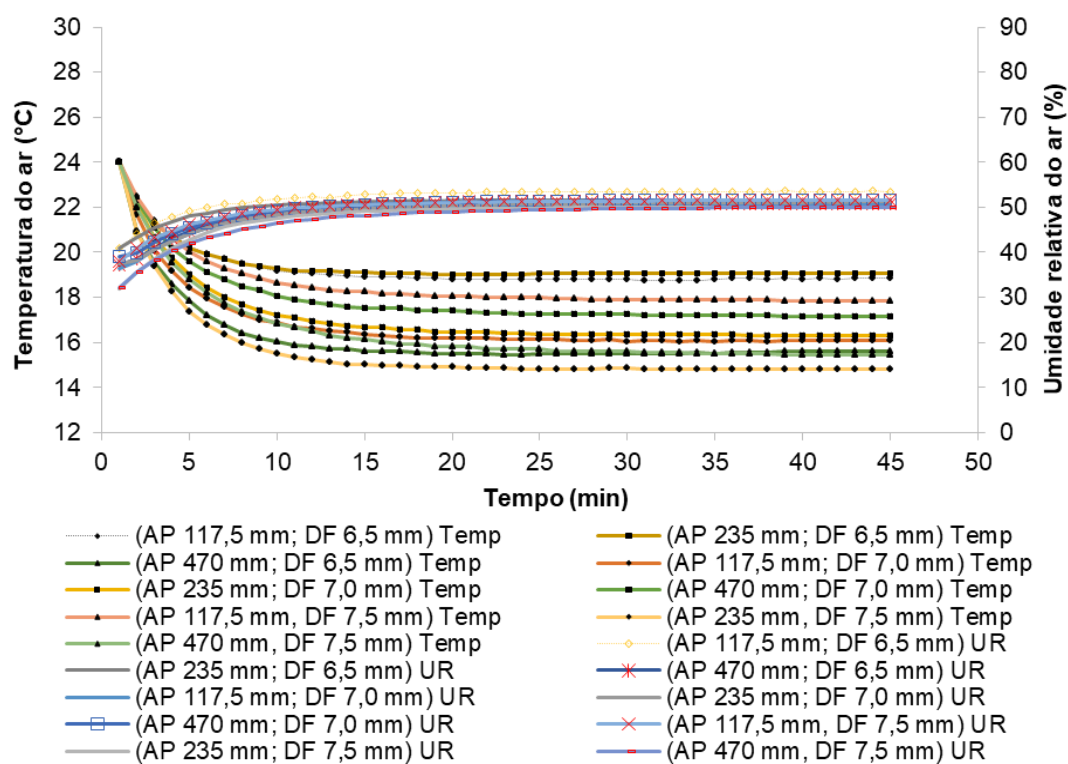


Figura 4 - Temperatura e Umidade relativa do ar da massa de grãos de milho com teor de água de 16%, em tubo com perfurações de 6,5, 7,0 e 7,5 mm, em três diferentes alturas de perfuração.

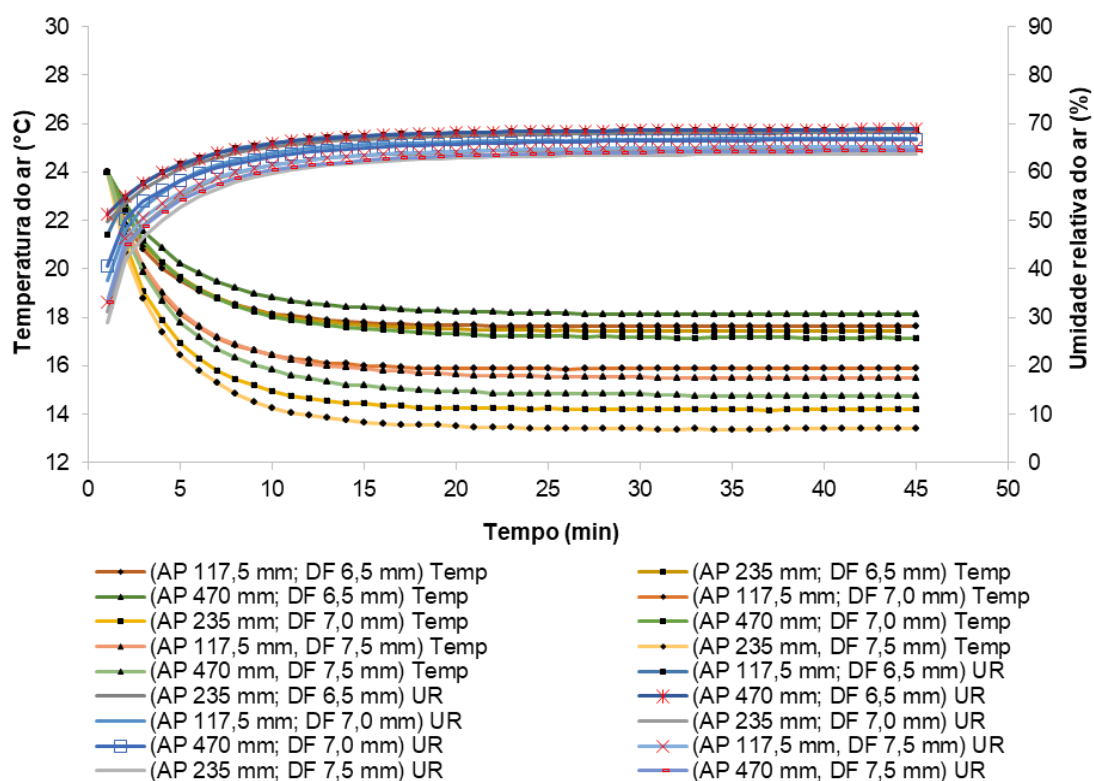


Figura 5 - Temperatura e Umidade relativa do ar da massa de grãos de milho com teor de água de 25%, em tubo com perfurações de 6,5, 7,0 e 7,5 mm, em três diferentes alturas de perfuração.

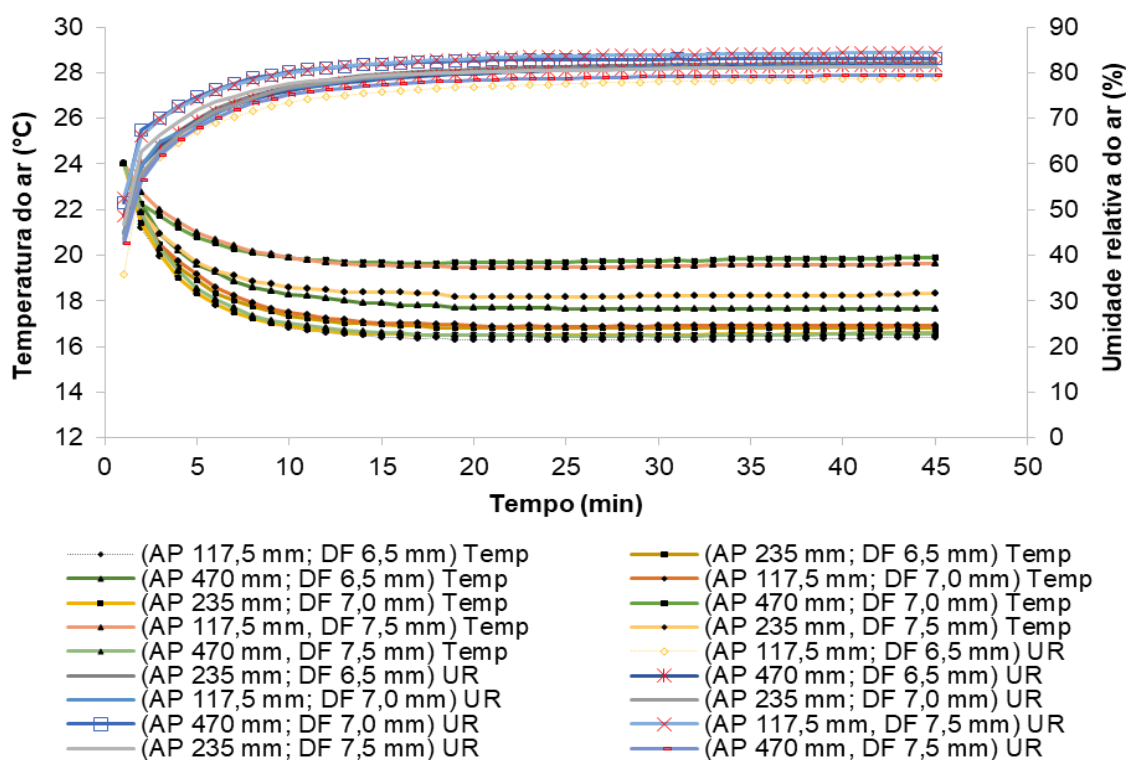


Figura 6 - Concentração de CO<sub>2</sub> da massa de grãos de milho com teor de água de 12%, em tubo com perfurações de 6,5, 7,0 e 7,5 mm, e alturas de perfuração de 117,5, 235 e 470 mm.

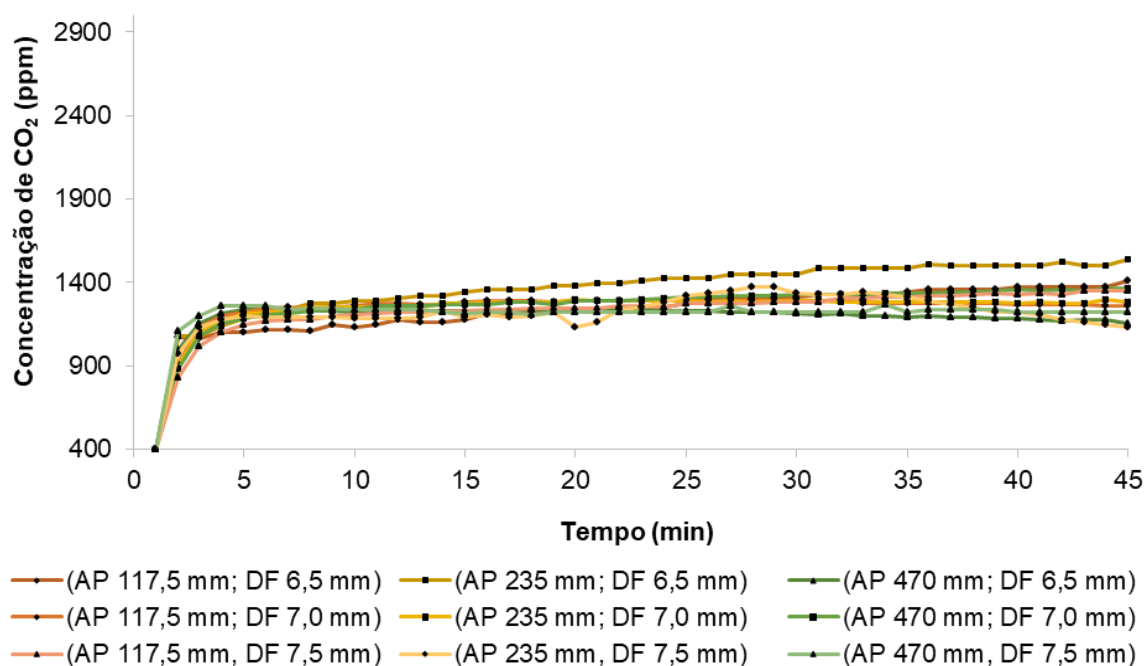


Figura 7 - Concentração de CO<sub>2</sub> da massa de grãos de milho com teor de água de 16%, em tubo com perfurações de 6,5, 7,0 e 7,5 mm, e alturas de perfuração de 117,5, 235 e 470 mm.

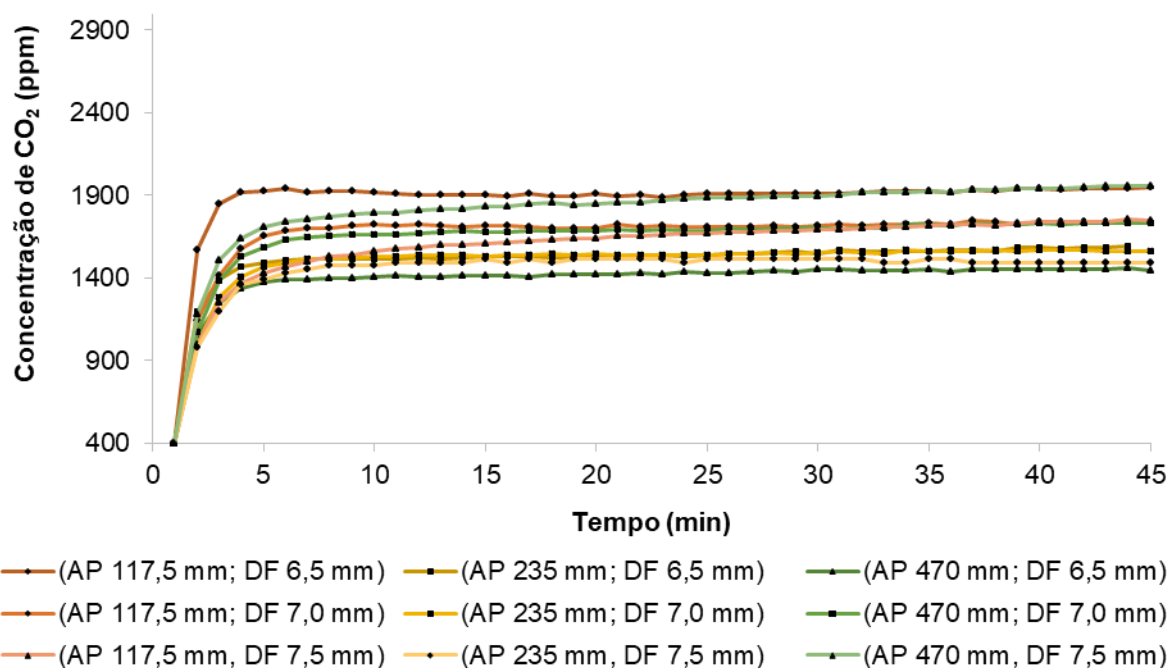
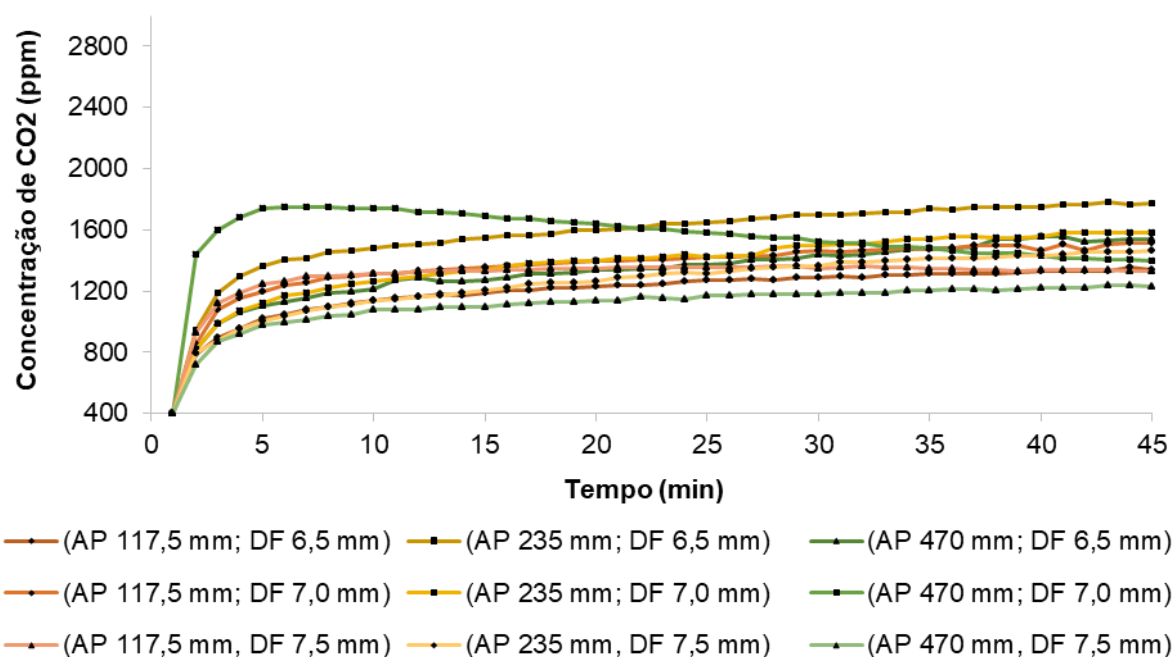


Figura 8 - Concentração de CO<sub>2</sub> da massa de grãos de milho com teor de água de 25%, em tubo com perfurações de 6,5, 7,0 e 7,5 mm, e alturas de perfuração de 117,5, 235 e 470 mm.



Entre os diâmetros dos furos e alturas de perfuração da sonda, verificou-se que 6,5 mm e 235 mm, respectivamente, alcançaram os melhores resultados de ajustes e estabilização das curvas de monitoramento de temperatura, umidade relativa e CO<sub>2</sub> ao longo do tempo (Tabelas 4-6). Em geral, os valores de R<sup>2</sup> foram baixos, a qual se justifica pela escala de aplicação, a qual foi próxima há uma condição real em volume de grãos.



Tabela 4 - Equações de regressão polinomial do comportamento da temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%) e CO<sub>2</sub> (ppm) da massa de grãos de milho com teor de água de 12%, em tubo com diferentes diâmetros de furo e alturas de perfuração.

Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Temperatura do ar (°C)	Umidade relativa do ar (%)	CO <sub>2</sub> (ppm)
6,50	117,5	$y = 0,0042x^2 - 0,2421x + 21,698$ R <sup>2</sup> = 0,7101	$y = -0,0104x^2 + 0,6227x + 45,537$ R <sup>2</sup> = 0,7865	$y = -0,2055x^2 + 16,43x + 1010,2$ R <sup>2</sup> = 0,455
	235	$y = 0,0038x^2 - 0,2237x + 22,19$ R <sup>2</sup> = 0,7357	$y = -0,009x^2 + 0,531x + 44,698$ R <sup>2</sup> = 0,7907	$y = -0,4124x^2 + 30,762x + 957,54$ R <sup>2</sup> = 0,7311
	470	$y = 0,0064x^2 - 0,367x + 19,878$ R <sup>2</sup> = 0,6618	$y = -0,0121x^2 + 0,7354x + 40,182$ R <sup>2</sup> = 0,858	$y = -0,3478x^2 + 16,932x + 1055,8$ R <sup>2</sup> = 0,1734
7,00	117,5	$y = 0,006x^2 - 0,3485x + 20,465$ R <sup>2</sup> = 0,7028	$y = -0,0119x^2 + 0,7216x + 40,386$ R <sup>2</sup> = 0,8101	$y = -0,4499x^2 + 25,924x + 898,65$ R <sup>2</sup> = 0,5057
	235	$y = 0,0062x^2 - 0,3731x + 21,131$ R <sup>2</sup> = 0,7853	$y = -0,0126x^2 + 0,7835x + 39,987$ R <sup>2</sup> = 0,8695	$y = -0,4564x^2 + 24,401x + 972,8$ R <sup>2</sup> = 0,3728
	470	$y = 0,0053x^2 - 0,3171x + 21,447$ R <sup>2</sup> = 0,7817	$y = -0,0116x^2 + 0,7131x + 41,363$ R <sup>2</sup> = 0,8598	$y = -0,3897x^2 + 25,125x + 919,2$ R <sup>2</sup> = 0,5648
7,50	117,5	$y = 0,005x^2 - 0,2966x + 21,589$ R <sup>2</sup> = 0,7745	$y = -0,0108x^2 + 0,6598x + 42,34$ R <sup>2</sup> = 0,8398	$y = -0,4528x^2 + 29,593x + 893,53$ R <sup>2</sup> = 0,6505
	235	$y = 0,0072x^2 - 0,4182x + 19,691$ R <sup>2</sup> = 0,6918	$y = -0,016x^2 + 0,9557x + 37,285$ R <sup>2</sup> = 0,8074	$y = -0,6774x^2 + 39,083x + 880,12$ R <sup>2</sup> = 0,5077
	470	$y = 0,0064x^2 - 0,3968x + 21,395$ R <sup>2</sup> = 0,8487	$y = -0,0141x^2 + 0,8909x + 36,282$ R <sup>2</sup> = 0,8786	$y = -0,2451x^2 + 12,394x + 1009,7$ R <sup>2</sup> = 0,1249

Tabela 5 - Equações de regressão polinomial do comportamento da temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%) e CO<sub>2</sub> (ppm) da massa de grãos de milho com teor de água de 16%, em tubo com diferentes diâmetros de furo e alturas de perfuração.

Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Temperatura do ar (°C)	Umidade relativa do ar (%)	CO <sub>2</sub> (ppm)
6,50	117,5	$y = 0,0045x^2 - 0,2653x + 21,493$ $R^2 = 0,7415$	$y = -0,0161x^2 + 0,9772x + 55,093$ $R^2 = 0,755$	$y = -0,454x^2 + 27,799x + 1164,1$ $R^2 = 0,4127$
	235	$y = 0,0051x^2 - 0,295x + 21,008$ $R^2 = 0,7071$	$y = -0,0153x^2 + 0,9169x + 55,463$ $R^2 = 0,7878$	$y = -0,3791x^2 + 26,294x + 1369,3$ $R^2 = 0,3708$
	470	$y = 0,0047x^2 - 0,2792x + 21,998$ $R^2 = 0,7966$	$y = -0,013x^2 + 0,8016x + 56,275$ $R^2 = 0,8499$	$y = -0,2942x^2 + 16,315x + 1066,2$ $R^2 = 0,1942$
7,00	117,5	$y = 0,0068x^2 - 0,385x + 20,947$ $R^2 = 0,6735$	$y = -0,0242x^2 + 1,4136x + 47,85$ $R^2 = 0,7067$	$y = -0,8854x^2 + 52,732x + 1460,5$ $R^2 = 0,4686$
	235	$y = 0,0075x^2 - 0,4407x + 19,852$ $R^2 = 0,7256$	$y = -0,025x^2 + 1,4879x + 45,055$ $R^2 = 0,6904$	$y = -0,4766x^2 + 24,182x + 1041$ $R^2 = 0,2838$
	470	$y = 0,006x^2 - 0,36x + 21,367$ $R^2 = 0,7781$	$y = -0,0198x^2 + 1,2073x + 50,255$ $R^2 = 0,7737$	$y = -0,6805x^2 + 41,679x + 1141,2$ $R^2 = 0,5529$
7,50	117,5	$y = 0,0064x^2 - 0,3782x + 20,494$ $R^2 = 0,7426$	$y = -0,0209x^2 + 1,2672x + 46,103$ $R^2 = 0,7413$	$y = -0,6413x^2 + 38,939x + 1181,8$ $R^2 = 0,524$
	235	$y = 0,008x^2 - 0,4611x + 18,615$ $R^2 = 0,6587$	$y = -0,0264x^2 + 1,5714x + 43,178$ $R^2 = 0,7217$	$y = -0,7152x^2 + 39,16x + 1311,1$ $R^2 = 0,3836$
	470	$y = 0,0072x^2 - 0,4279x + 20,138$ $R^2 = 0,7434$	$y = -0,022x^2 + 1,3312x + 45,271$ $R^2 = 0,7514$	$y = -0,6364x^2 + 39,086x + 1100,6$ $R^2 = 0,5648$

Tabela 6 - Equações de regressão polinomial do comportamento da temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%) e CO<sub>2</sub> (ppm) da massa de grãos de milho com teor de água de 25%, em tubo com diferentes diâmetros de furo e alturas de perfuração.

Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Temperatura do ar (°C)	Umidade relativa do ar (%)	CO <sub>2</sub> (ppm)
6,50	117,5	$y = 0,0057x^2 - 0,3279x + 20,397$ $R^2 = 0,6897$	$y = -0,0251x^2 + 1,5569x + 55,705$ $R^2 = 0,7079$	$y = -0,3166x^2 + 22,135x + 735,4$ $R^2 = 0,733$
	235	$y = 0,0054x^2 - 0,3137x + 20,842$ $R^2 = 0,7032$	$y = -0,025x^2 + 1,5197x + 60,321$ $R^2 = 0,7657$	$y = -0,5353x^2 + 43,302x + 762,8$ $R^2 = 0,9207$
	470	$y = 0,005x^2 - 0,2995x + 21,416$ $R^2 = 0,7611$	$y = -0,0234x^2 + 1,4601x + 60,562$ $R^2 = 0,8215$	$y = -0,5713x^2 + 43,546x + 945,43$ $R^2 = 0,8332$
7,00	117,5	$y = 0,0056x^2 - 0,3252x + 20,715$ $R^2 = 0,708$	$y = -0,0262x^2 + 1,5868x + 59,2$ $R^2 = 0,7465$	$y = -0,4464x^2 + 35,641x + 734,31$ $R^2 = 0,906$
	235	$y = 0,0053x^2 - 0,3035x + 20,185$ $R^2 = 0,6212$	$y = -0,0262x^2 + 1,5847x + 59,363$ $R^2 = 0,7358$	$y = -0,4258x^2 + 31,156x + 807,9$ $R^2 = 0,7963$
	470	$y = 0,0031x^2 - 0,1651x + 21,566$ $R^2 = 0,5492$	$y = -0,019x^2 + 1,1229x + 67,133$ $R^2 = 0,7058$	$y = -0,6544x^2 + 26,248x + 1585,6$ $R^2 = 0,2282$
7,50	117,5	$y = 0,0039x^2 - 0,2252x + 22,084$ $R^2 = 0,7331$	$y = -0,0217x^2 + 1,3369x + 65,302$ $R^2 = 0,7813$	$y = -0,5253x^2 + 30,33x + 810,73$ $R^2 = 0,6695$
	235	$y = 0,0033x^2 - 0,1993x + 22,574$ $R^2 = 0,8313$	$y = -0,017x^2 + 1,0582x + 68,774$ $R^2 = 0,7985$	$y = -0,5376x^2 + 40,527x + 844,38$ $R^2 = 0,8749$
	470	$y = 0,0056x^2 - 0,3199x + 20,438$ $R^2 = 0,6558$	$y = -0,0242x^2 + 1,4558x + 59,215$ $R^2 = 0,7429$	$y = -0,3491x^2 + 28,951x + 637,96$ $R^2 = 0,9234$

## 5.2 MONITORAMENTO DA MASSA DE GRÃOS DE MILHO NO TRANSPORTE

Após a validação do equipamento, aplicou-se o mesmo para uma análise em escala real, onde se simulou um sistema de transporte de grãos. Neste experimento, monitoraram-se a variável temperatura, umidade relativa e CO<sub>2</sub> para determinação da qualidade física indireta dos grãos com teores de água de 12 e 16%, em três posições verticais do perfil da massa de grãos (inferior, central e superior), ao longo de 0, 2, 8 e 24 horas.

Verificou-se na Figura 9, que a massa de grãos com teores de água a 12% obteve um aumento da temperatura na camada inferior e central nas primeiras 8 horas de monitoramento, e posteriormente uma redução da temperatura até às 24 horas de monitoramento. Diferentemente ocorreu para a posição superior da camada de grãos, quando se observou uma redução da temperatura nas primeiras horas (até 10 horas) e um aumento da mesma até às 24 horas de monitoramento. Estes resultados influenciaram na umidade relativa intergranular (Figura 10), as quais foram constantes do início ao final do tempo de monitoramento nas posições inferior e central, porém apresentou uma oscilação com uma leve redução a partir das 10 horas de monitoramento.

Os resultados de temperatura e umidade relativa do ar indicaram uma condição constante de 14,2 e 13,9% de umidade de equilíbrio higroscópico da massa de grãos nas posições inferior e central, respectivamente, ao longo do tempo de monitoramento (Figura 11). Por outro lado, acompanhando as variações observadas nas Figuras 9 e 10, verificou-se que a umidade de equilíbrio higroscópico dos grãos na camada superior aumentou de 12 para 13% até às 10 horas de monitoramento, posteriormente reduziu para 10,4% às 12 horas, chegando ao final do tempo de monitoramento com uma condição de 11,2%. As alterações observadas na condição intergranular, principalmente nas camadas superiores teve influência, também, da variação que ocorreu com a temperatura e umidade relativa do ambiente (Figuras 9 e 10).

Bakhtavar et al. (2019) avaliaram a adsorção de água em grãos de trigo, milho, algodão e quinoa embaladas em bolsas herméticas e materiais de embalagem tradicionais, incluindo papel, polipropileno, juta e sacos de tecido, em ambientes com 60, 70, 80 e 90% de umidade relativa. Os autores observaram que os teores de água dos grãos aumentaram nos materiais de embalagem tradicionais com o

aumento da umidade relativa. Segundo os autores, o armazenamento dos grãos em bolsas herméticas reduziu a respiração da massa de grãos e a variação dos teores de água, colaborando para a manutenção da umidade de equilíbrio higroscópico dos grãos nas condições seguras de armazenamento.

Os resultados obtidos por Bakhtavar et al. (2019) vão de encontra aos resultados das camadas inferiores e centrais de grãos, as quais sofreram menores influencias do ambiente externo. Nessas condições, verificou-se que a respiração média da massa de grãos elevou-se para 450 ppm, nas primeira 3,5 horas de monitoramento (Figura 12), em seguida reduziu para a condição inicial, permanecendo até o final do período de monitoramento. Como os níveis de respiração permaneceram baixos, com uma concentração de CO<sub>2</sub> próximos do ambiente (420 ppm), não houve consumo de matéria seca nos grãos.

Figura 9 - Monitoramento da temperatura do ar intergranular na massa de grãos de milho com teores de água 12% (b.u.) ao longo do tempo.

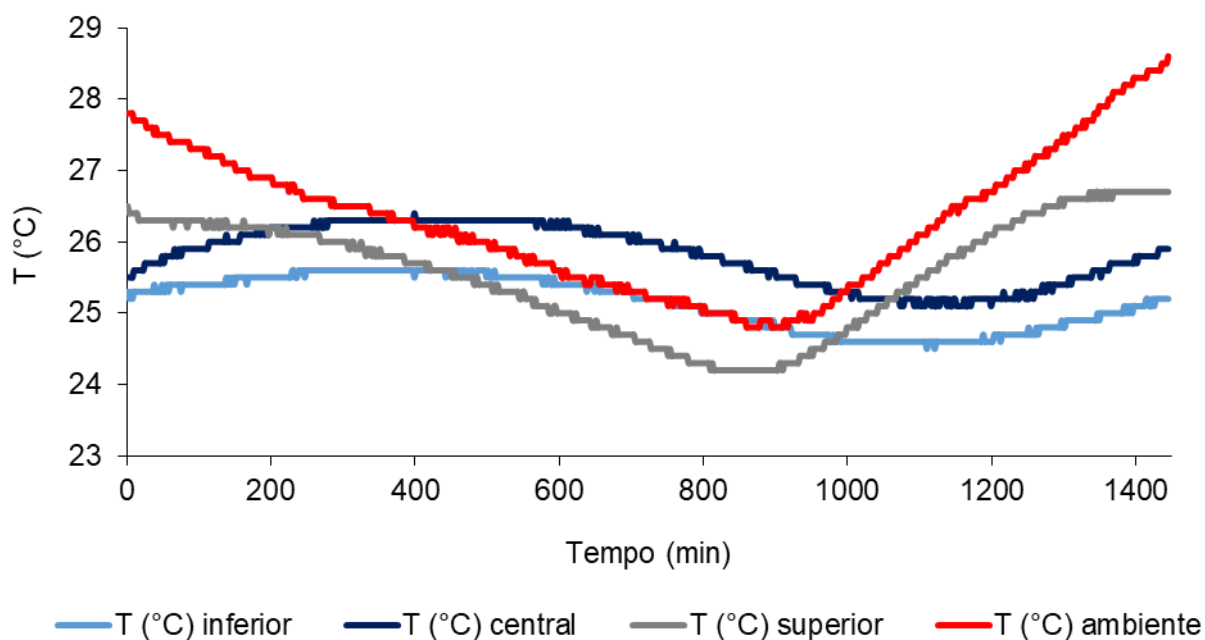


Figura 10 - Monitoramento da umidade relativa do ar intergranular na massa de grãos de milho com teores de água 12% (b.u.) ao longo do tempo.

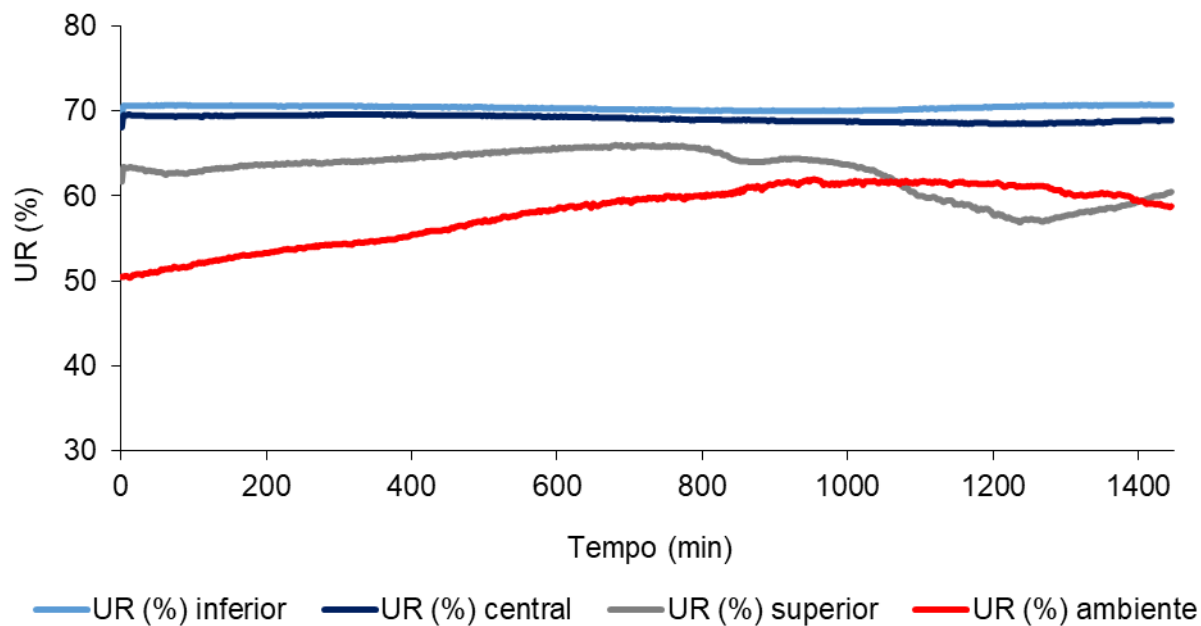


Figura 11 - Monitoramento da umidade de equilíbrio higroscópico do ar intergranular e a massa de grãos de milho com teores de água 12% (b.u.) ao longo do tempo.

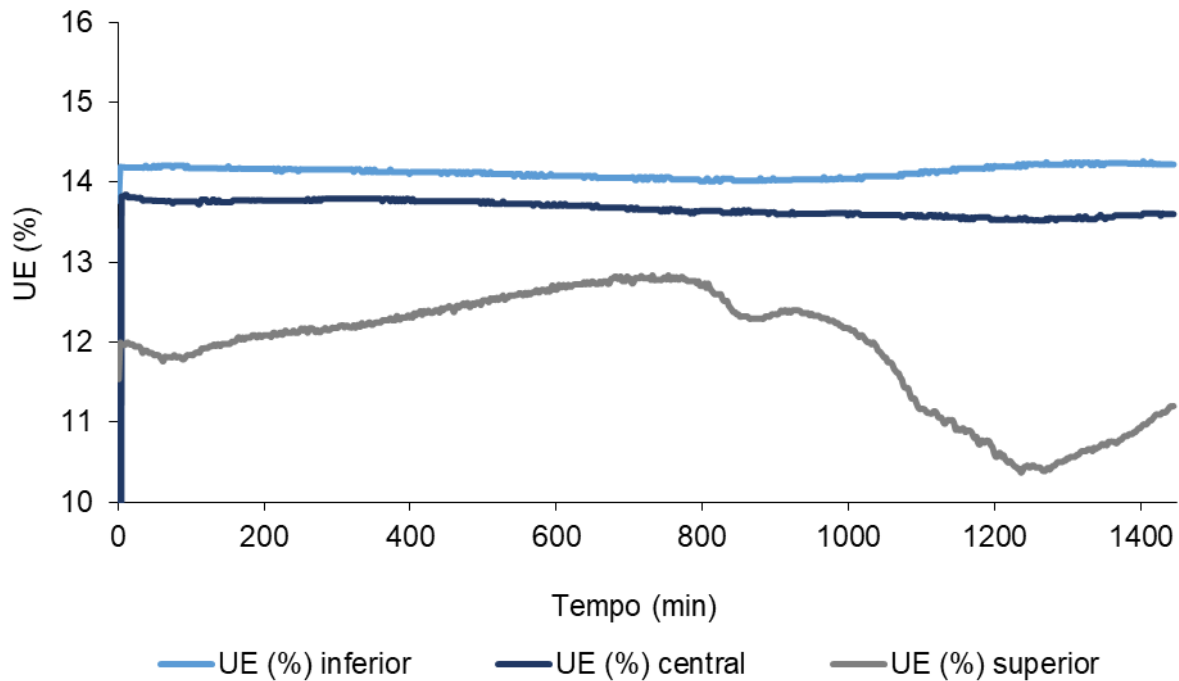
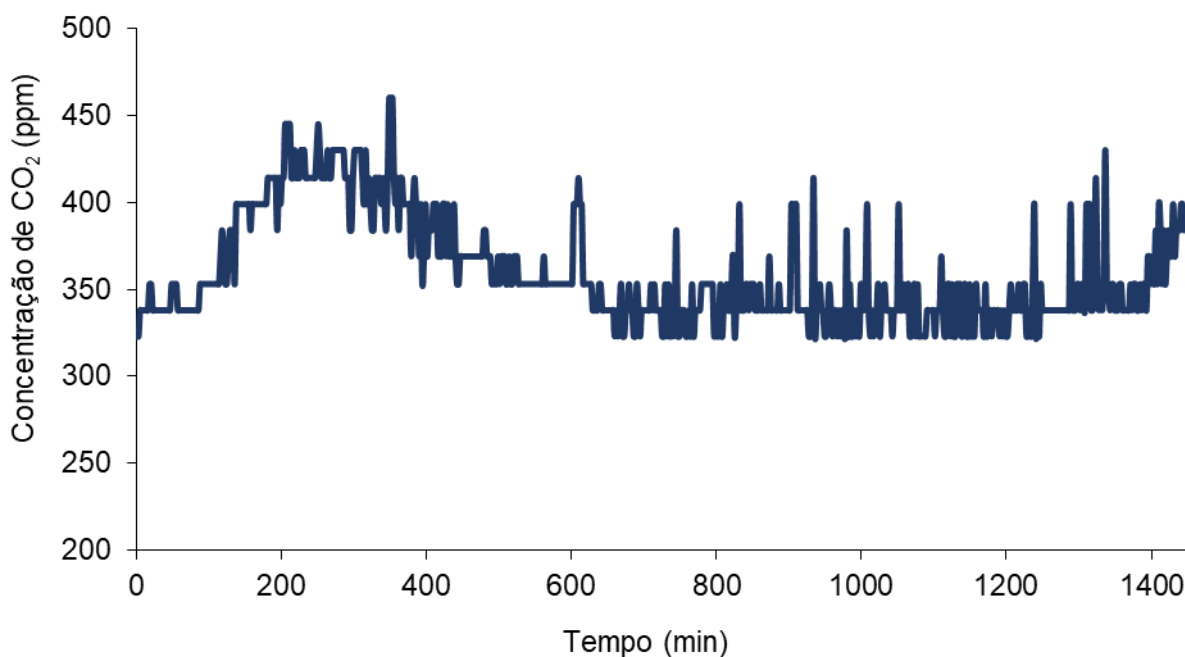


Figura 12 - Monitoramento da concentração de dióxido de carbono no ar intergranular da massa de grãos de milho com teores de água 12% (b.u.) ao longo do tempo.



Na avaliação da massa de grãos com teores de água de 16%, verificou-se o mesmo comportamento das curvas de temperatura e umidade relativa do ar intergranular nas três camadas (inferior, central e superior), mesmo com variações do ambiente externo (Figura 13 e 14).

Nesta situação, o alto teor de água (16%) teve maior influência sobre as trocas gasosas do ar intergranular do que a condição externa (temperatura e umidade relativa). Observou-se que a variação da temperatura (Figura 13) foi semelhante, porém maiores (24,5 a 26,5 °C) ao observado na Figura 9. Enquanto que, as umidades relativas nas três camadas permaneceram constantes do início ao final do tempo de monitoramento (entre 80 a 90%), sendo superiores do ambiente externo (entre 50 a 60%) (Figura 14).

As condições de 16% de teor de água fizeram com que a massa de grãos alcançasse a umidade de equilíbrio higroscópico logo nos primeiros instantes do monitoramento, permanecendo constante até o final do período, entre 19 à 21% na camada inferior e central e próximo a 24% na camada superior da massa de grãos (Figura 15). Assim, logo nas primeiras 2 horas de monitoramento verificou-se uma intensidade respiratória da massa de grãos, chegando ao limite de 5000 ppm de

concentração de CO<sub>2</sub> e permanecendo constante até o período final de monitoramento (Figura 16).

A alta respiração da massa de grãos proporcionou um consumo e uma perda de matéria seca nos grãos (Figura 17), desde as primeiras 2 horas de monitoramento. Estimou-se uma perda de 0,06% de matéria seca ao longo de 24 horas de monitoramento, resultado este considerado significativo, tendo em vista o curto período de avaliação. Jian et al. (2014) avaliaram concentrações intersticiais de dióxido de carbono e oxigênio em sementes de canola, soja e trigo armazenadas em diferentes tempos, teores de água e temperaturas. Segundos os autores, as maiores diferenças significativas de concentrações de CO<sub>2</sub> foi verificada em função do tempo de armazenamento e temperaturas de 40 °C.

Ubhi e Sadaka (2015) verificaram diferentes taxas de respiração da massa de grãos de milho em função das temperaturas de 23, 35 e 45 °C, e teores de água iniciais de 12,9, 14,8, 17,0, 18,8 e 20,7%. Os autores verificaram que a respiração acumulada chegou a 2,625 g/kg em grãos com teores de água de 18,8% e temperatura média de 35 °C, após nove dias de armazenamento. Ochandio et al. (2017) verificaram que a taxa de respiração de sementes de soja em armazenamento hermético, nas temperaturas de 15, 25 e 35 °C e teores de água de 13, 15 e 17% foi de 0,130 a 20,272 mg CO<sub>2</sub> / (kg<sub>dms</sub>).

Coradi et al. (2015) avaliaram a perda de matéria seca do milho armazenado com 10 °C e 90%, 30 °C e 40% de temperatura e umidade relativa, respectivamente. Os autores verificaram que o milho armazenado nas condições de 10 °C e 90% teve índice de contaminação por fungos, enquanto que, os grãos armazenados a 30 °C e 40% tiveram uma maior perda de matéria seca e alterações físicas durante o tempo de armazenamento. Taher et al. (2019) construíram um modelo para predição de perdas em grãos de soja armazenados em silo bag, com base no monitoramento da concentração de CO<sub>2</sub>, e verificaram através da respiração da massa de grãos perdas de 0,07% a 2,16% de matéria seca. Garcia-Cela et al. (2019) avaliaram a respiração de grãos de milho contaminado naturalmente em diferentes condições de armazenamento, com 0,80 à 0,99 de atividade de água e 15 à 35 °C de temperatura. A mais elevada taxa de respiração ocorreu a 0,95 de atividade de água e temperatura entre 30 a 35 °C. Nessas condições, os autores verificaram uma maior perda de matéria seca.



Figura 13 - Monitoramento da temperatura do ar intergranular na massa de grãos de milho com teores de água 16% (b.u.) ao longo do tempo.

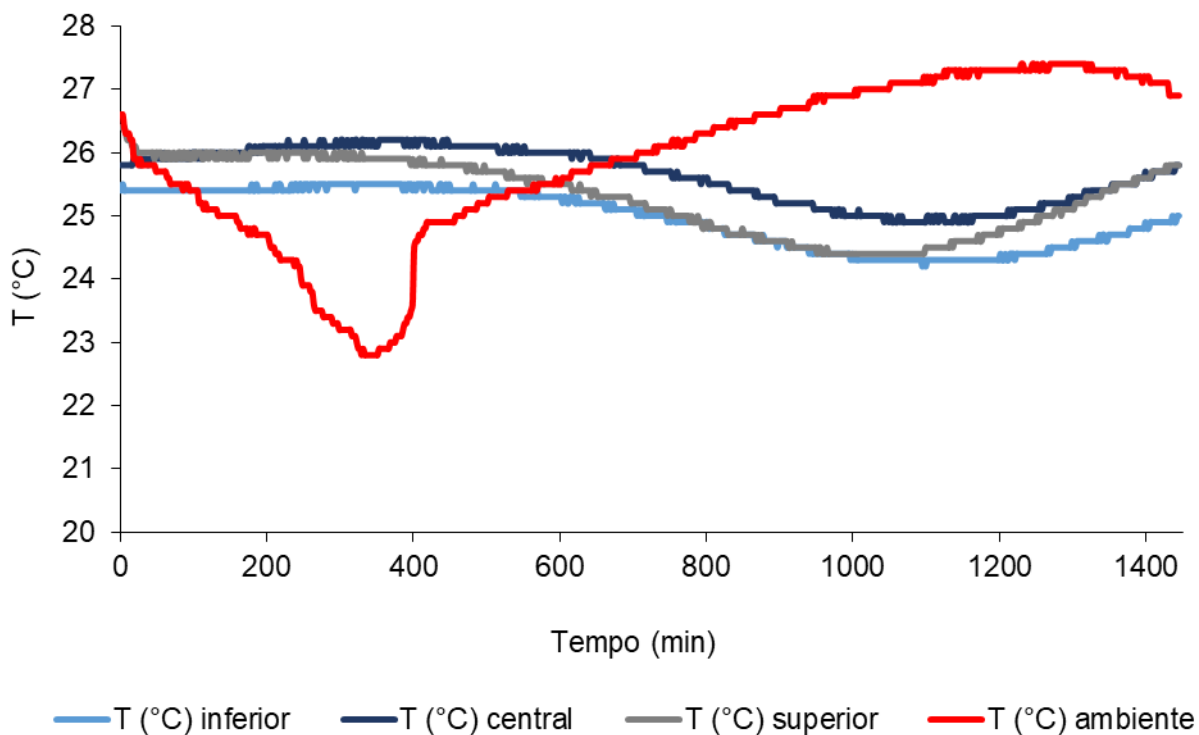


Figura 14 - Monitoramento da umidade relativa do ar intergranular na massa de grãos de milho com teores de água 16% (b.u.) ao longo do tempo.

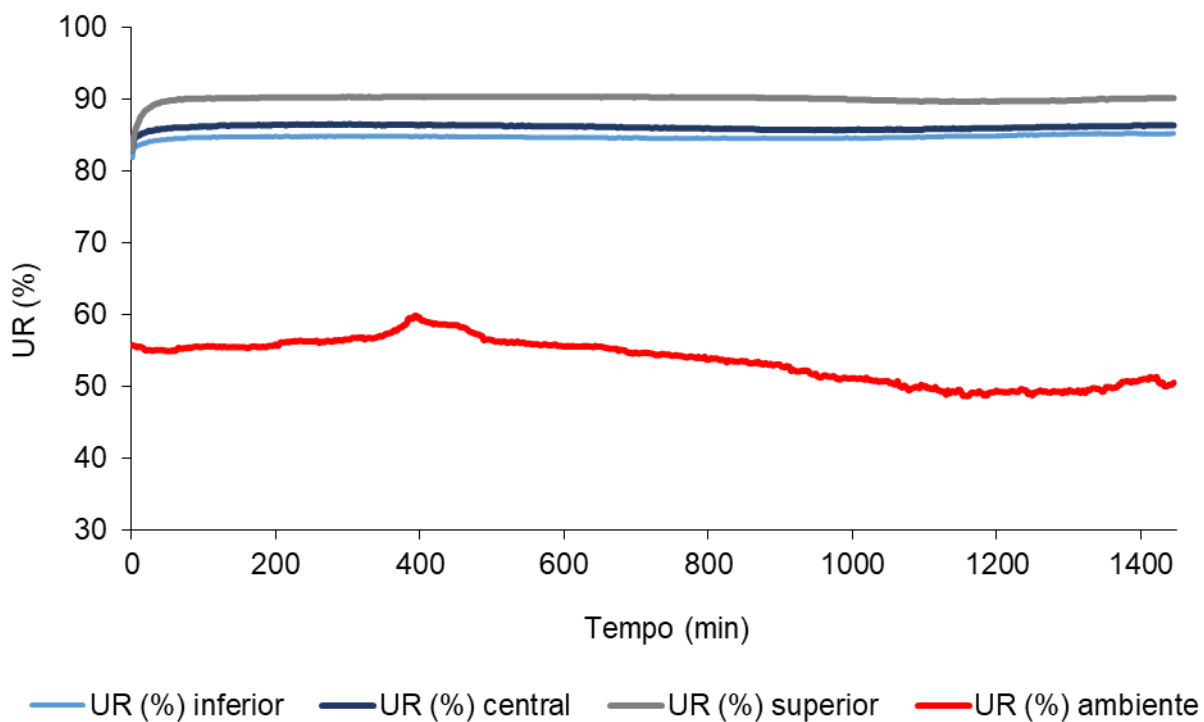


Figura 15 - Monitoramento da umidade de equilíbrio higroscópico do ar intergranular e a massa de grãos de milho com teores de água 16% (b.u.) ao longo do tempo.

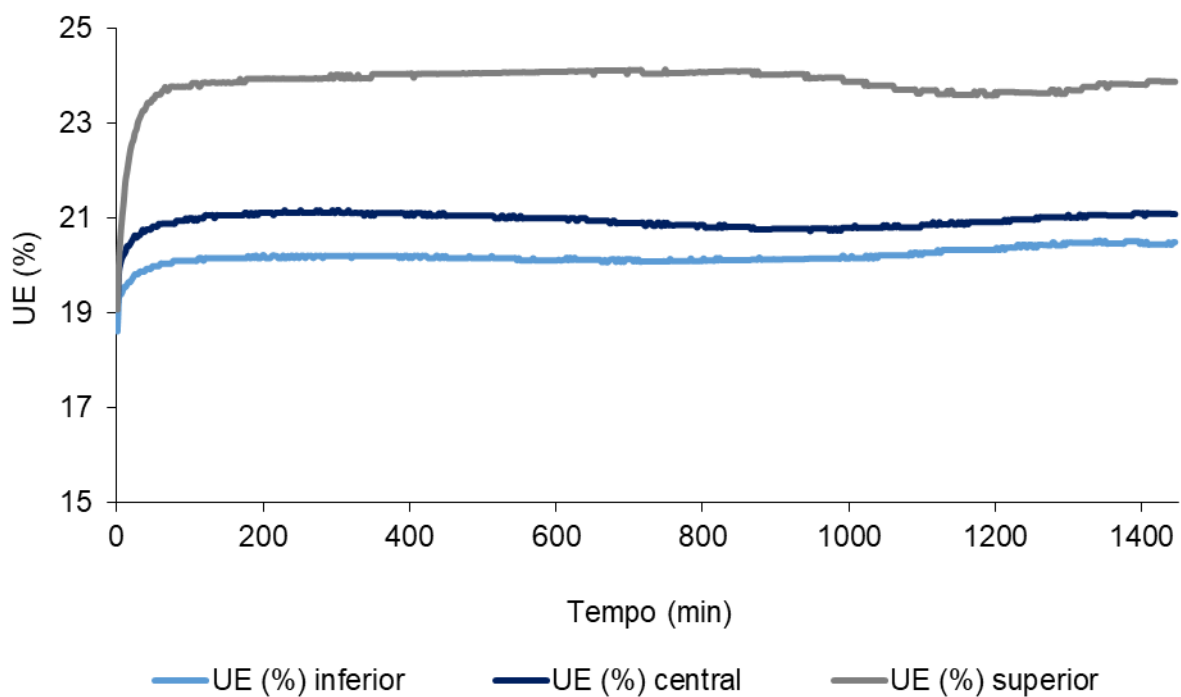


Figura 16 - Monitoramento da concentração de dióxido de carbono no ar intergranular da massa de grãos de milho com teores de água 16% (b.u.) ao longo do tempo.

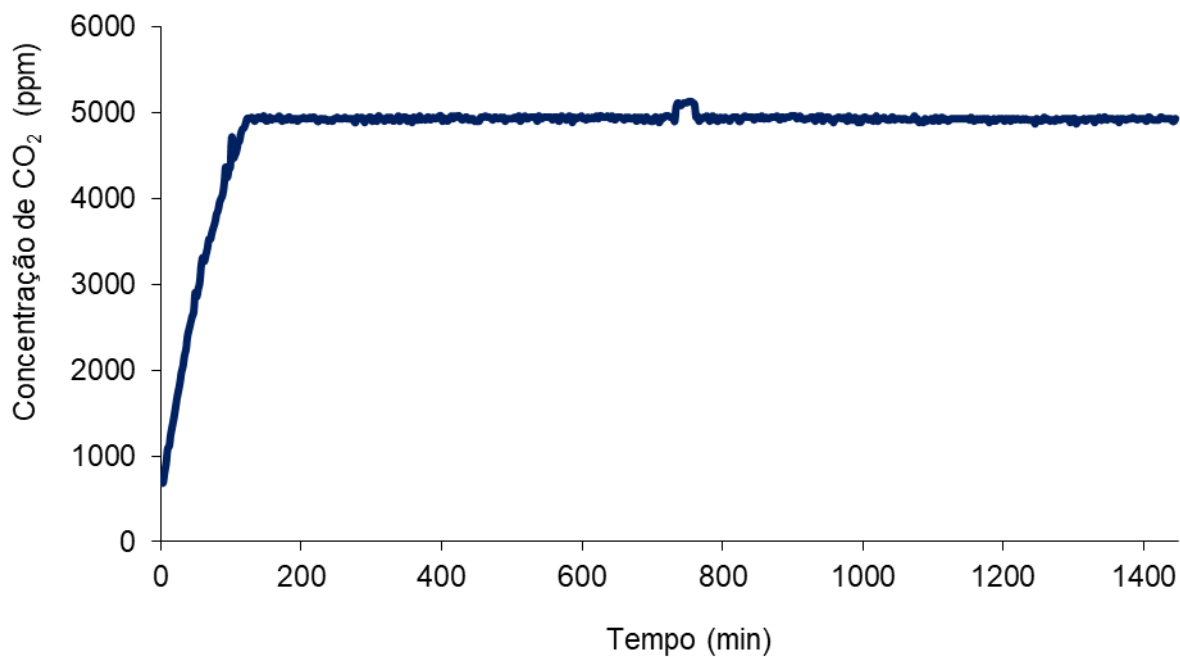
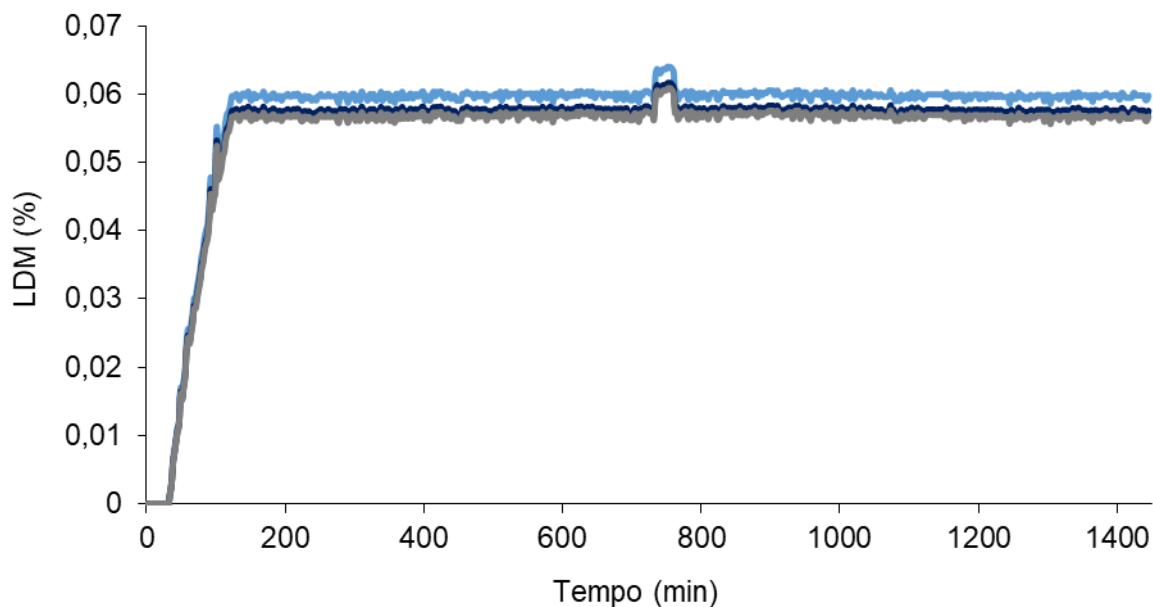


Figura 17 - Monitoramento da perda de matéria seca da massa de grãos de milho com teores de água 16% (b.u.) ao longo do tempo.



### 5.3 AVALIAÇÃO DA QUALIDADE FÍSICA DOS GRÃOS

O teste de condutividade elétrica (Figura 18) indicou que a estrutura celular dos grãos de milho foi afetada ao longo do tempo de monitoramento, em função dos teores de água iniciais (12 e 16%) e pela posição de avaliação (camada inferior, central e superior) da massa de grãos. Entre as camadas, observou-se que os grãos posicionados na parte superior do transporte (superior) sofreram, levemente, as maiores alterações físicas, concordando com os resultados obtidos do monitoramento (temperatura, umidade relativa e  $\text{CO}_2$ ). Entretanto, os maiores danos físicos nos grãos foram encontradas nos teores de água de 12%.

Os resultados de condutividade elétrica refletiram sobre a germinação dos grãos (Figura 19). O percentual de grãos germinados foi menor na posição superior da camada de grãos e principalmente, para os grãos com teores de água de 12%. O aumento da temperatura, umidade relativa do ar intergranular e, conseqüentemente da umidade de equilíbrio higroscópico, proporcionou aquecimento e uma maior intensidade respiratória da massa de grãos, principalmente para os grãos com teores de água de 16%. Porém, o aumento da atividade metabólica dos grãos com 16% de teor de água (hidratados) dentro do período de 24 horas de monitoramento, simulando-se um sistema de transporte de grãos, colaborou para o aumento do percentual de germinação, quando submetidos ao teste. Ressalta-se que durante o

transporte não é desejável que haja germinação dos grãos, ou seja, neste caso os resultados obtidos de germinação são indicativos de possíveis alterações físicas que podem inferir sobre a qualidade final da massa de grãos.

Santos et al. (2012) avaliaram a qualidade e a perda de matéria seca em grãos de milho armazenados sob diferentes temperaturas. Para isso, os grãos de milho com teores de água iniciais de 14,8 e 17,9% foram acondicionados em bolsas e armazenadas em temperaturas de 15, 25 e 35 °C. Ao longo de 150 dias, em intervalos de 30 dias, as concentrações de oxigênio (O<sub>2</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) foram medidas e amostras dos grãos foram retiradas para a determinação do teor de água, massa específica aparente e matéria seca, percentual de germinação e classificação física. Em 150 dias, a perda de matéria seca dos grãos de milho armazenados com teor de água de 14,8% foi de aproximadamente 3,5 vezes inferior à verificada para o produto armazenado com teor de água de 17,9%. Com base nos resultados de germinação, um limite de 0,015% de perda de matéria seca pode ser considerado como admissível para a manutenção da integridade dos grãos.

Em um estudo realizado por Paraginski et al. (2015), os autores avaliaram a qualidade de grãos de milho armazenados nas temperaturas de 5, 15, 25 e 35 °C, durante 12 meses. Os resultados de peso de mil grãos, germinação e condutividade elétrica indicaram que as maiores alterações foram observadas nos grãos armazenados nas temperaturas mais elevadas, principalmente entre 25 a 35 °C, indicando que o tempo de armazenamento seguro dos grãos nessas condições deve ser menor, quando comparado ao armazenamento em baixas temperaturas.

Figura 18 - Avaliação de estrutura celular dos grãos de milho com teores de água 12 e 16% (b.u.), pelo teste de condutividade elétrica, ao longo do período de monitoramento.

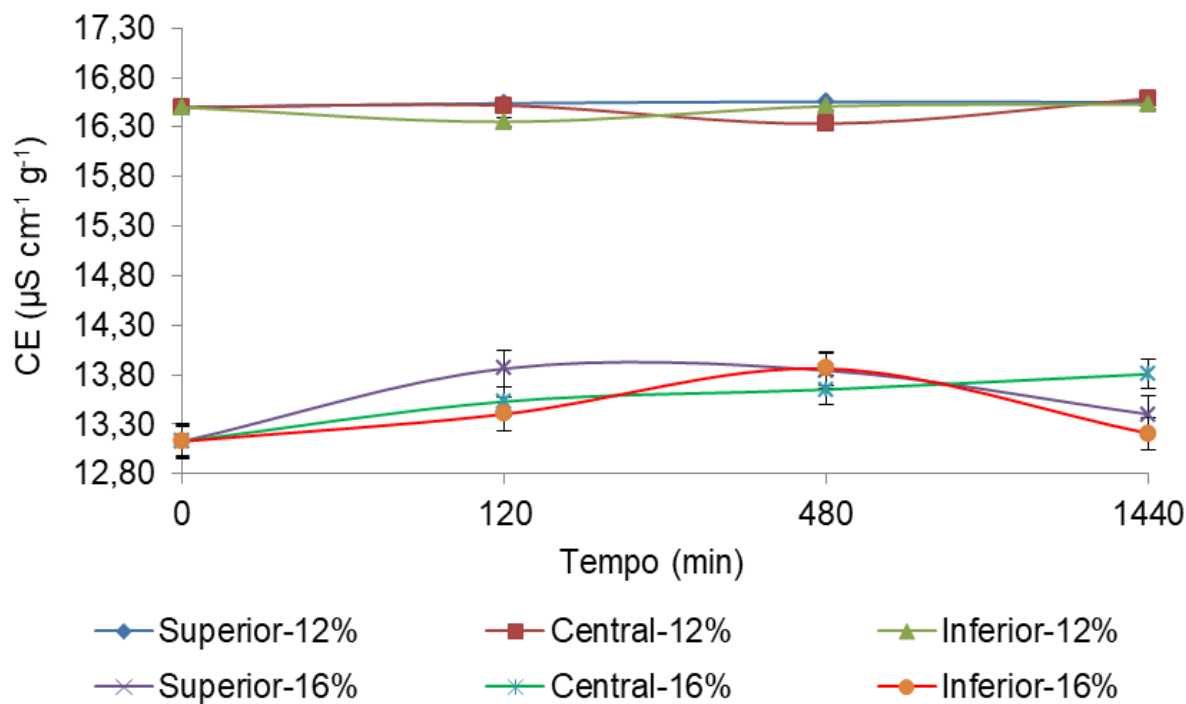
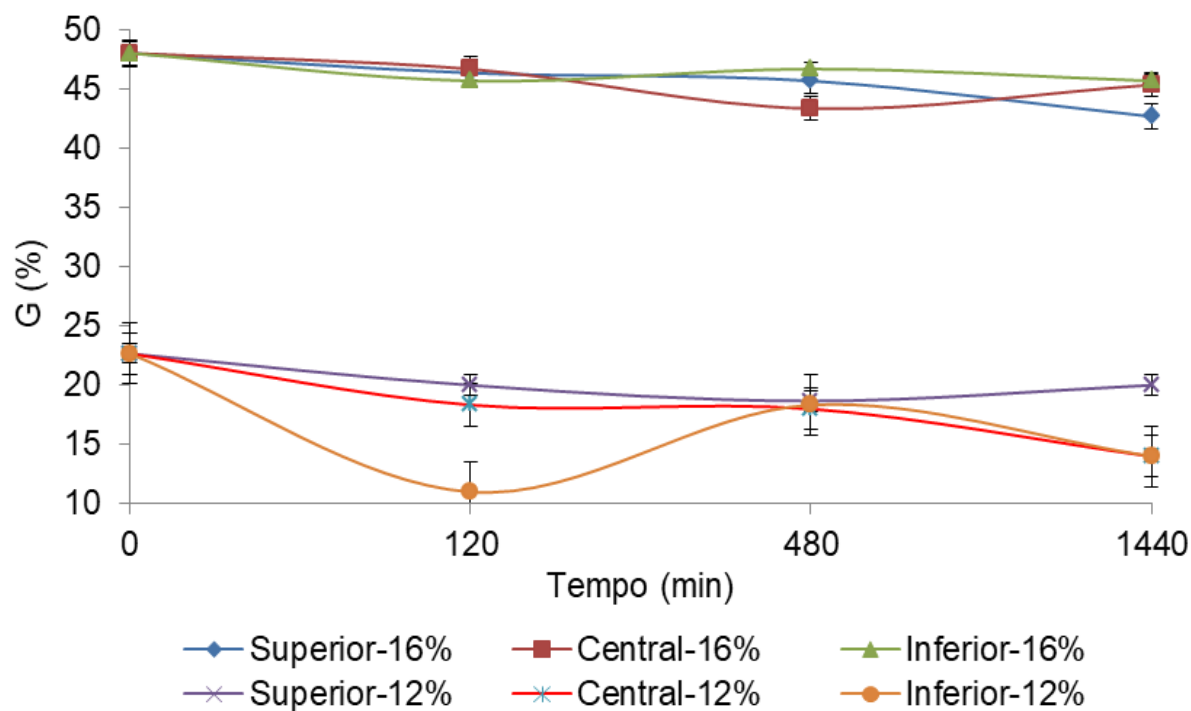


Figura 19 - Avaliação do percentual de germinação dos grãos de milho com teores de água 12 e 16% (b.u.) ao longo do tempo.



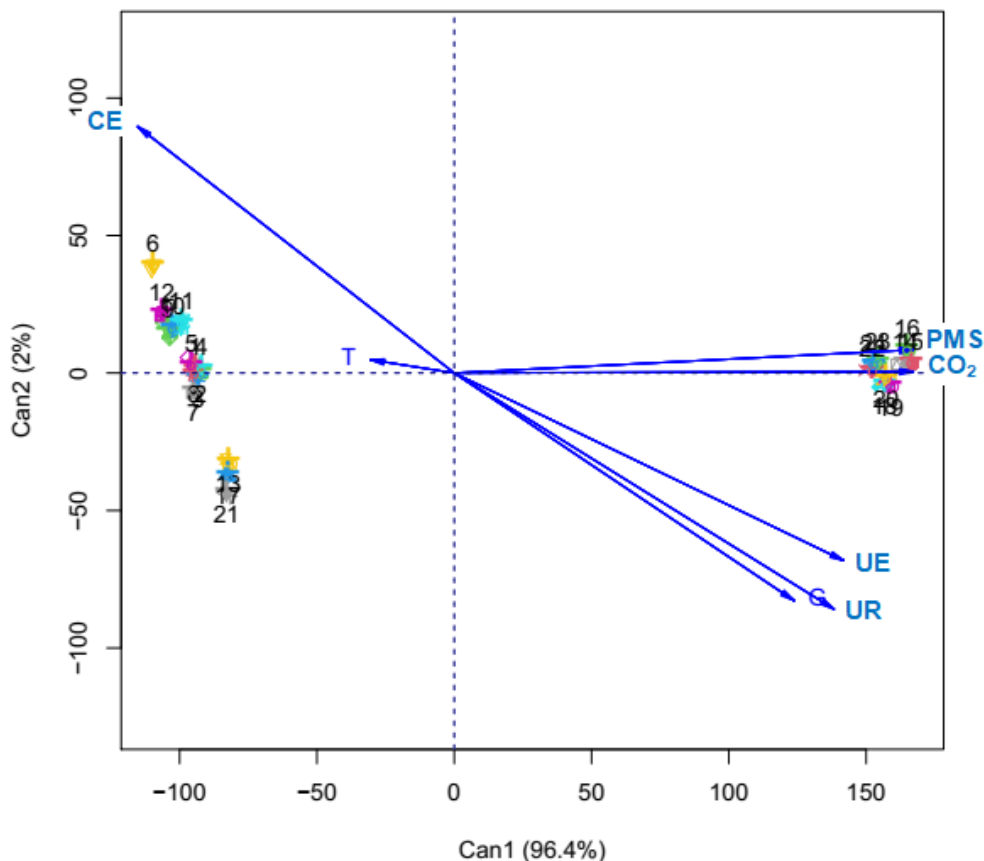
#### 5.4 ANÁLISES MULTIVARIADAS

A análise das duas primeiras variáveis canônicas coletadas apresentadas na Figura 20 reuniu 98,4% da variação total entre os tratamentos para as variáveis avaliadas. Neste biplot, tratamentos próximos à Figura apresentam alta similaridade. Os vetores (setas) apontam para as variáveis que mais influenciaram a similaridade de tratamentos específicos.

Ao analisarmos os quadrantes, verificamos a formação de três grupos distintos, com padrões claros de associações com a maioria das variáveis avaliadas. O primeiro grupo alocou os tratamentos 8, 10, 11, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 22, 23 e 24 que se destacaram em relação às variáveis PMS e CO<sub>2</sub>. O segundo grupo reuniu os tratamentos 1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 12 com menor variação as variáveis T e CE. O terceiro grupo conteve os tratamentos 13, 17 e 21, que não se destacaram para nenhuma variável de forma específica. As variáveis UR, UE e G não se destacaram para nenhum dos tratamentos, especificamente.

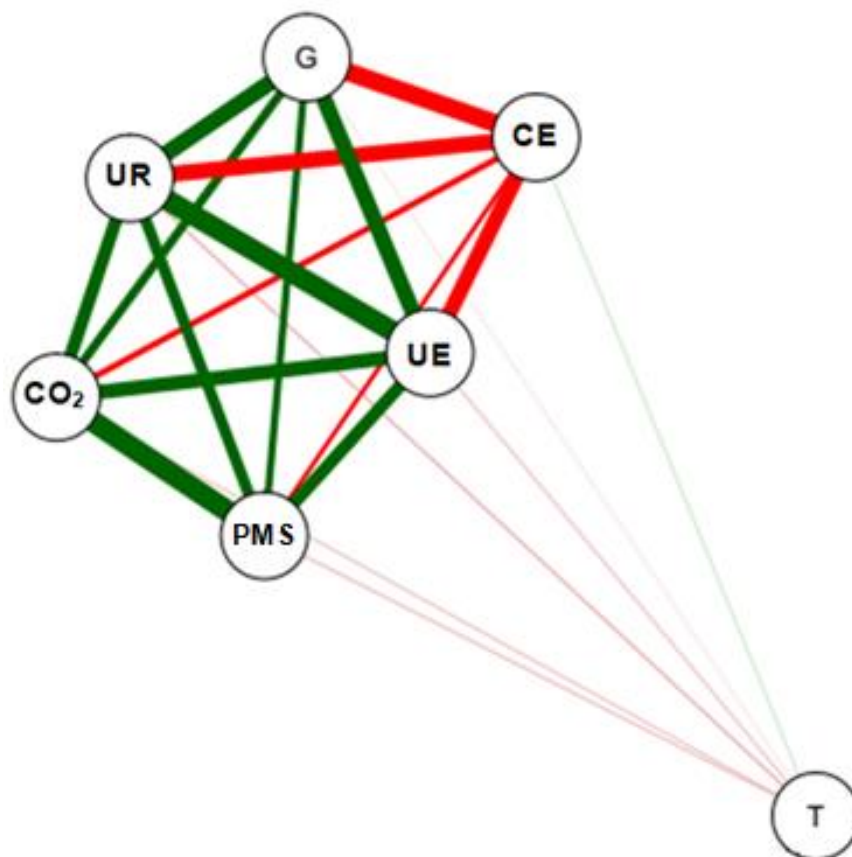
Com os resultados de agrupamentos, verificou-se que os tratamentos com teores de água de 16%, na posição superior das camadas de grãos e a partir do tempo de monitoramento de 2 horas tiveram maior influencia sobre as variáveis, principalmente para o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e perda de matéria seca (PMS).

Figura 20 - Análise das variáveis canônicas qualitativas dos grãos de milho.



Os resultados da análise da correlação entre as variáveis são mostrados na Figura 21. Uma forte correlação positiva pode ser verificada entre as variáveis PMS  $\times$  CO<sub>2</sub>, UE  $\times$  UR, UR  $\times$  G e UE  $\times$  G, e uma correlação positiva moderada foram mostradas entre CO<sub>2</sub>  $\times$  UR, PMS  $\times$  UR, CO<sub>2</sub>  $\times$  UE, UE  $\times$  PMS e G  $\times$  PMS. No entanto, entre as variáveis CE  $\times$  G, CE  $\times$  UE, CE  $\times$  UR houve uma forte correlação negativa, com uma correlação negativa moderada mostrada entre as variáveis CE  $\times$  CO<sub>2</sub>. A variável T correlacionou-se com todas as demais variáveis de uma forma negativa e fraca com UR, UE, PMS, CO<sub>2</sub> e G e de uma forma positiva e fraca com CE. 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 grão de milho. Os resultados corroboram com os obtidos por Coradi et al. (2020a), Coradi et al. (2020b), Coradi et al. (2020c) e Coradi et al. (2020d).

Figura 21 - Análise de correlação de Pearson das variáveis qualitativas dos grãos de milho.



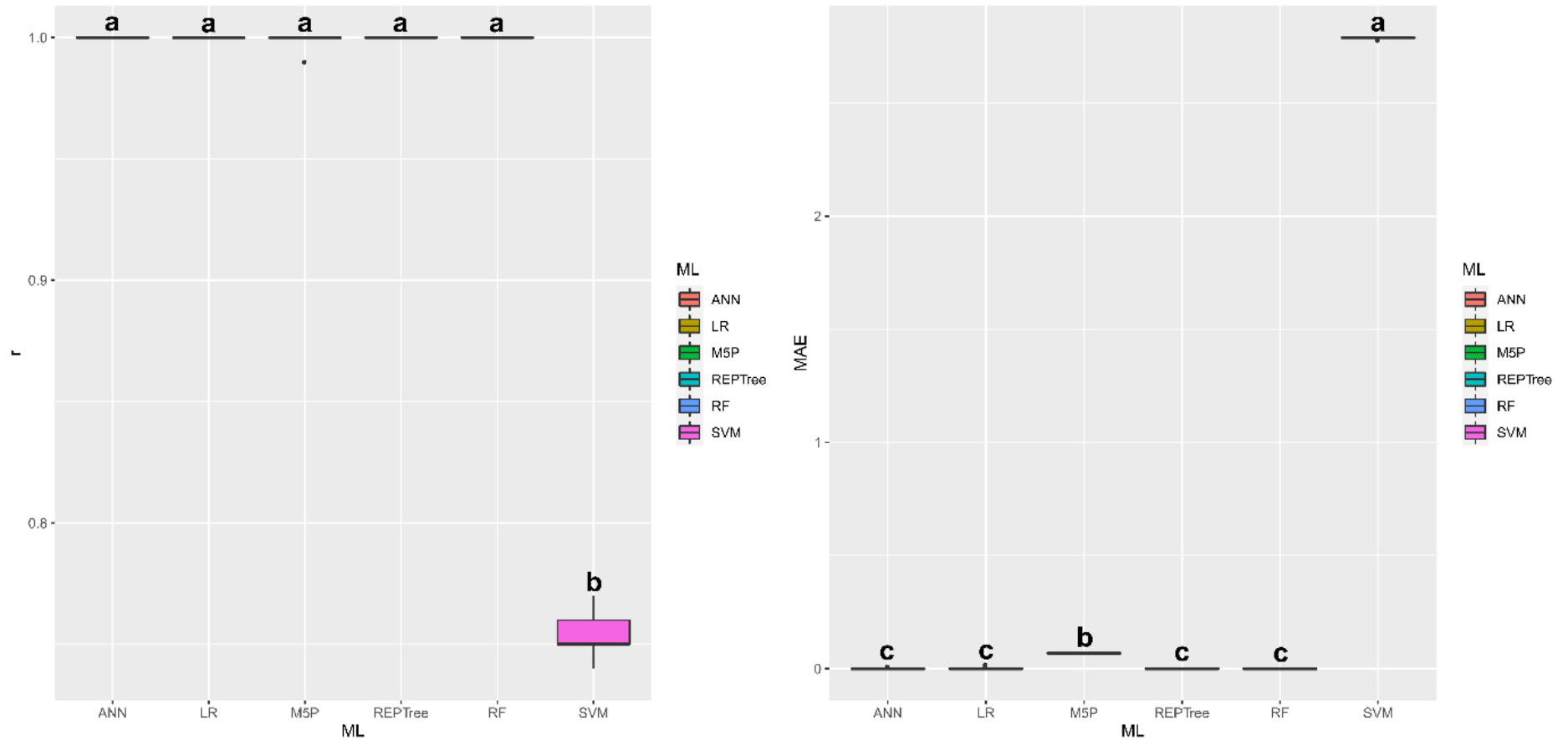
### 5.5 MODELOS DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINA

Houve diferenças estatísticas ( $p$ -valor $<0,01$ ) entre as técnicas de aprendizagem de máquina avaliadas quanto às estatísticas coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) e erro médio absoluto (MAE) entre os valores observados e estimados para todas as variáveis avaliadas.

Para a massa específica aparente (Figura 22), as técnicas ANN, LR, M5P, REPTree e RF apresentaram os maiores valores de  $r$ , sem diferir estatisticamente entre si. Quanto ao MAE, estas mesmas técnicas, com exceção do M5P, apresentaram as menores médias.

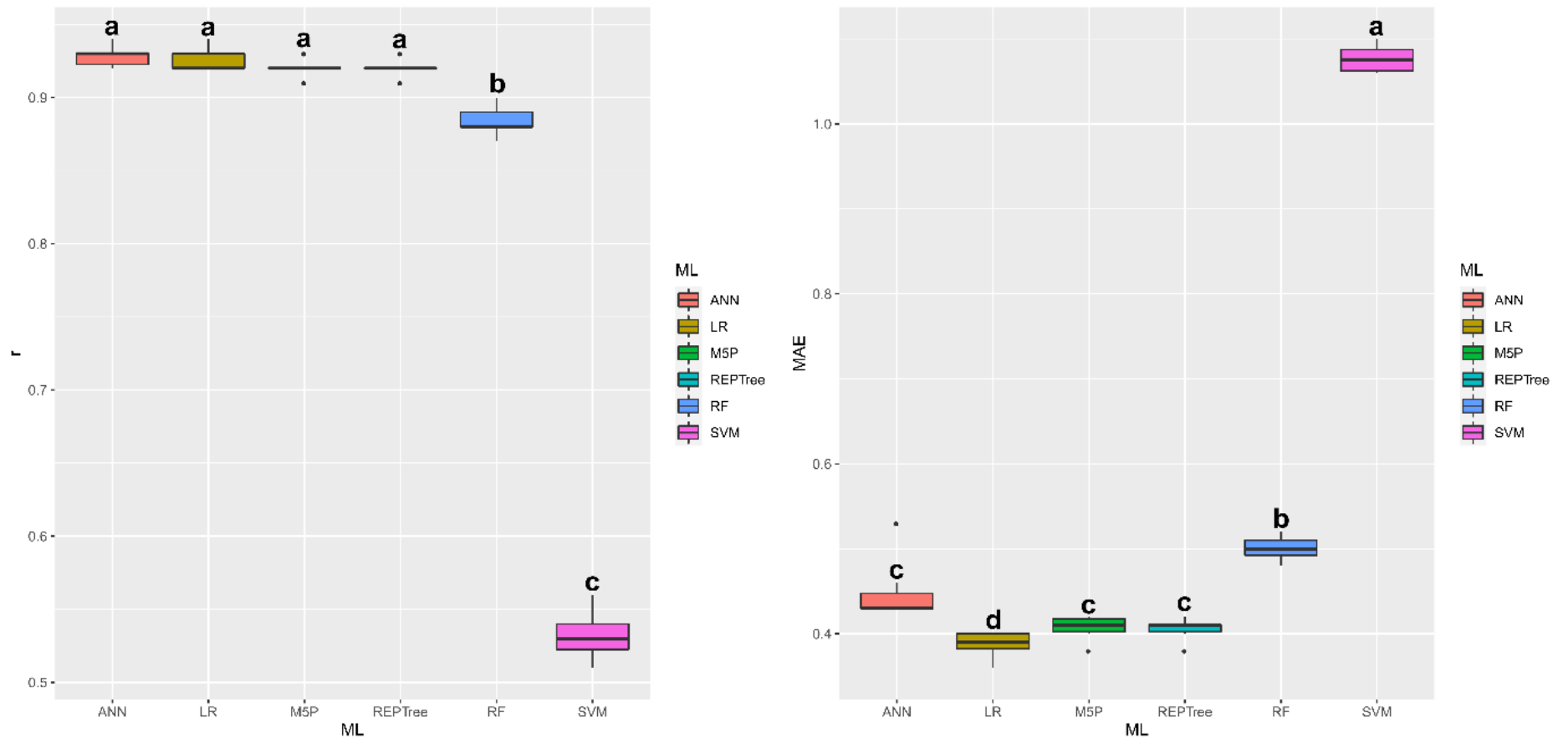


Figura 22 - Boxplot para as variáveis, coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) e erro médio absoluto (MAE) entre os valores observados e estimados de massa específica aparente em grãos de milho por diferentes modelos de aprendizagem de máquina e entradas. Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.



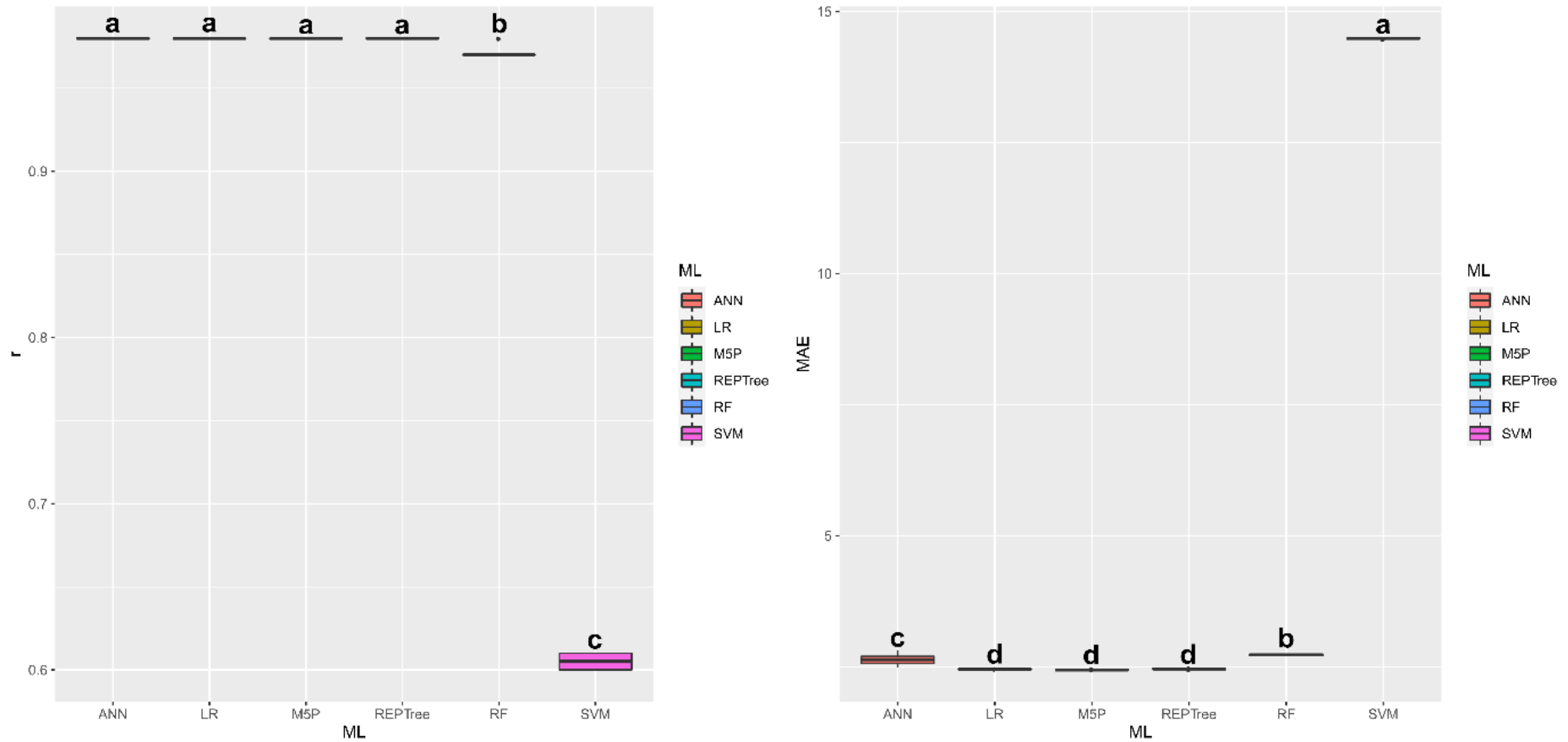
As técnicas ANN, LR, M5P e REPTree apresentaram as maiores médias de  $r$  entre os valores estimados e preditos da condutividade elétrica (Figura 23). Contudo, ao analisar o MAE, observa-se que a LR apresentou os menores valores.

Figura 23 - Boxplot para as variáveis, coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) e erro médio absoluto (MAE) entre os valores observados e estimados da condutividade elétrica em grãos de milho por diferentes modelos de aprendizagem de máquina e entradas.



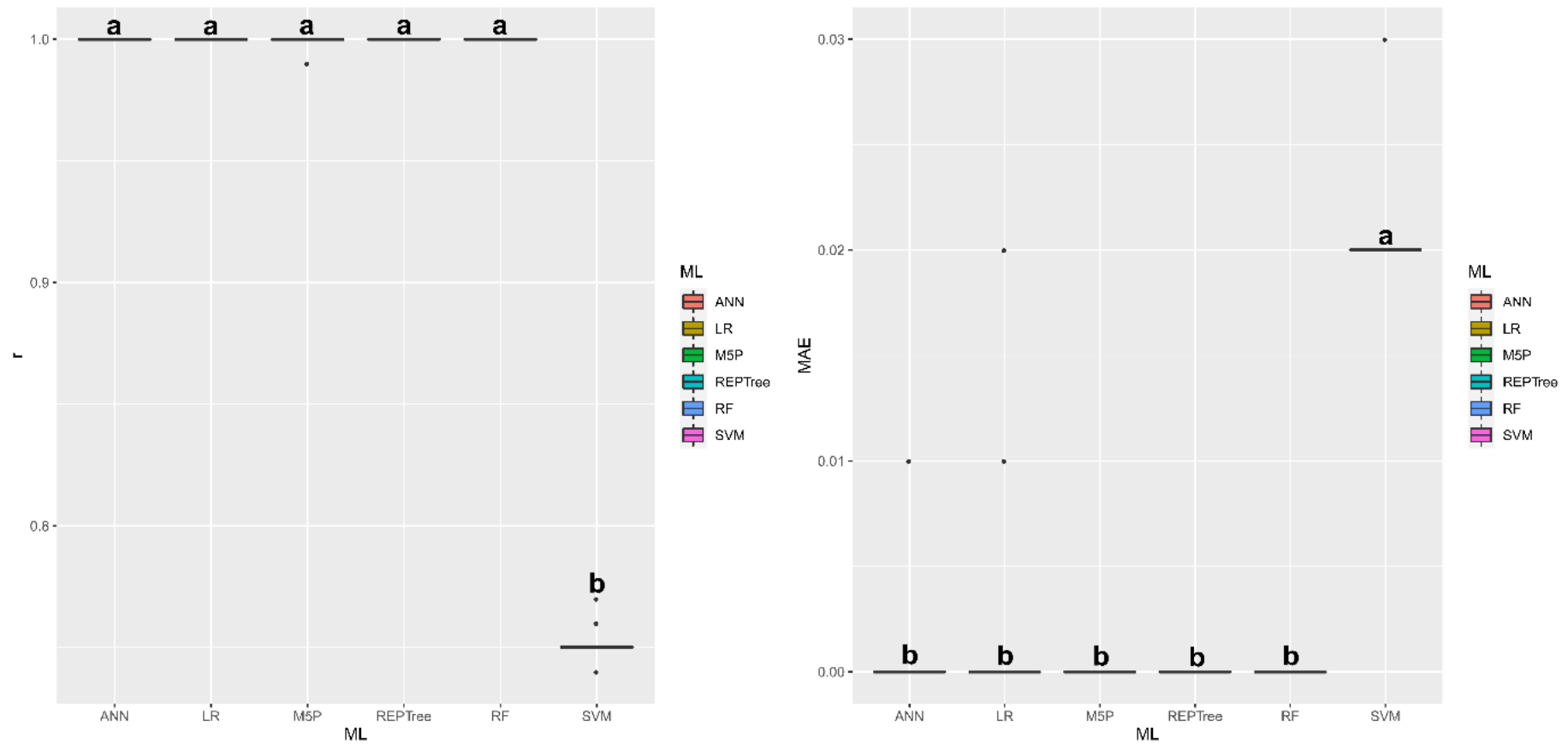
Para a germinação (Figura 24), as técnicas ANN, LR, M5P e REPTree apresentaram os maiores valores de  $r$ , sem diferir estatisticamente entre si. Quanto ao MAE, estas mesmas técnicas, com exceção da ANN, apresentaram as menores médias.

Figura 24 - Boxplot para as variáveis, coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) e erro médio absoluto (MAE) entre os valores observados e estimados da germinação em grão de milho por diferentes modelos de aprendizagem de máquina e entradas. Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.



As técnicas ANN, LR, M5P, REPTree e RF apresentaram as maiores médias de  $r$  entre os valores estimados e preditos da condutividade elétrica (Figura 25). Estas mesmas técnicas apresentaram as menores médias de MAE.

Figura 25 - Boxplot para as variáveis, coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) e erro médio absoluto (MAE) entre os valores observados e estimados da perda de matéria seca em grãos de milho por diferentes modelos de aprendizagem de máquina e entradas. Médias seguidas por letras iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.



## 5 CONCLUSÕES

O sistema de monitoramento com sensores para medição em tempo real da temperatura, umidade relativa e concentração de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na massa de grãos de milho, com teores de água de 12, 16 e 25% (b.u.), ao longo de 24 horas de transporte, em três posições (inferior, central e superior do perfil da massa de grãos) obteve resultados satisfatórios, as quais foram validadas para uma sonda com diâmetro de furo 6,5 mm e altura de perfuração de 225 mm.

O monitoramento em tempo real das variáveis temperatura, umidade relativa e concentração de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) do ar intergranular determinaram de forma indireta e precocemente as alterações de qualidade física dos grãos ao longo do transporte, confirmadas pelas análises físicas de condutividade elétrica e germinação. No período de 2 horas as variáveis monitoradas indicaram indiretamente as alterações físicas que ocorreram na massa de grãos. A condição de 16% de teor de água do milho e a posição de superior do perfil da massa de grãos sofreram as maiores alterações física de qualidade, principalmente quanto à perda de matéria seca, em função da elevada umidade de equilíbrio higroscópico e respiração da massa de grãos.

O monitoramento da massa de grãos de milho em tempo real e a aplicação de regressão linear múltipla e algoritmos de Machine Learning predisseram as perdas quantitativas e qualitativas de grãos de milho no transporte. Todos os modelos de Machine Learning, com exceção do algoritmo máquina de vetor suporte obtiveram bons resultados, entretanto, a regressão linear múltipla alcançou os melhores ajustes, sendo indicado para a predição de perdas de grãos no transporte de milho.

## REFERÊNCIAS

ABDIPOUR, Moslem et al. Modeling oil content of sesame (*Sesamum indicum* L.) using artificial neural network and multiple linear regression approaches. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 95, n. 3, p. 283-297, 2018.

ASAE. American Society of Agricultural Engineers. Moisture measurement-unground grain and seeds. In: Standards, 2000.St. **Joseph**: ASAE, p.563, 2000.

AOAC. Association of Official Analytical Chemists. **Official methods of Official Analytical Chemists**. 17. Ed. Gaithersburg, 2000.

BAKHTAVAR, Muhammad Amir; AFZAL, Irfan; BASRA, Shahzad Maqsood Ahmed. Moisture adsorption isotherms and quality of seeds stored in conventional packaging materials and hermetic Super Bag. **Plos One**, v. 14, n. 2, p. e0207569, 2019.

BARRETO, Alien Arias et al. Validation of a heat, moisture and gas concentration transfer model for soybean (*Glycine max*) grains stored in plastic bags (silo bags). **Biosystems Engineering**, v. 158, p. 23-37, 2017.

BAUDET, L. M., Villela, F. A. **Armazenamento**. Seed News, Pelotas, v. 4, n. 4, p. 28- 32, 2000.

BLAIFI, Sid-ali et al. M5P model tree based fast fuzzy maximum power point tracker. **Solar Energy**, v. 163, p. 405-424, 2018.

BOUCKAERT, R et al. WEKA manual for version p.3-7-1, 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para Análise de Sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Defesa Agropecuária, Brasília, Mapa / ACS, p. 399, 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**, v. 42, p. 272-278, 2012.

CARNEIRO, Luciana Maria Terra Alves et al. Diferentes épocas de colheita, secagem e armazenamento na qualidade de grãos de trigo comum e duro. **Bragantia**, v. 64, n. 1, p. 127-137, 2005.

CORADI, Paulo Carteri et al. Loss of dry matter in grain corn stored under different conditions and effects on quality. **Revista Brasileira de Tecnologia**, v. 9, n. 1, p. 1757-1770, 2015.

CORADI, Paulo Carteri et al. Adaptation of technological packaging for conservation of soybean seeds in storage units as an alternative to modified atmospheres. **Plos One**, v. 15, n. 11, e0241787, 2020a.

CORADI, Paulo Carteri et al. Evaluation of coatings for application in raffia big bags in conditioned storage of soybean cultivars in seed processing units. **Plos One**, v. 15, n. 11, e0242522, 2020b.

CORADI, Paulo Carteri et al. Correlation using multivariate analysis and control of drying and storage conditions of sunflower grains on the quality of the extracted vegetable oil. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 44, n. 12, e14961, 2020c.

CORADI, Paulo Carteri et al. Soybean seed storage: Packaging technologies and conditions of storage environments. **Journal of Stored Products Research**, v. 89, 101709, 2020d.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira, grãos**. 2019. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>>.

DANAO, Mary-Grace C.; ZANDONADI, Rodrigo S.; GATES, Richard S. Development of a grain monitoring probe to measure temperature, relative humidity, carbon dioxide levels and logistical information during handling and transportation of soybeans. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 119, p. 74-82, 2015.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Milho**, 2019. Disponível em: <<http://www.embrapa.gov.br>>.

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.

GARCIA-CELA, Esther et al. Influence of storage environment on maize grain: CO<sub>2</sub> production, dry matter losses and aflatoxins contamination. **Food Additives & Contaminants: Part A**, v. 36, n. 1, p. 175-185, 2019.

HUANG, Haibo et al. Diffusion and production of carbon dioxide in bulk corn at various temperatures and moisture content. In: **2013 Kansas City, Missouri, July 21-July 24, 2013**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2013. p. 1.

ISTA. International Seed Testing Association. Determination of other seeds by number. In: **International rules for seed testing**. ed. 2008. Bassersdorf, cap. 4, p. 41-43, 2008.

JAQUES, Lanes Beatriz Acosta et al. **Desenvolvimento e validação de um dispositivo para monitoramento da qualidade da massa de grãos de soja no transporte rodoviário**. 2021. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria.

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**, v. 57, p. 63-72, 2014.

KODALI, Sai Kaushik; MUNTEAN, Cristina Hava. An Investigation into Deep Learning Based Network Intrusion Detection System for IoT Systems. In: **2021 IEEE International Conference on Data Science and Computer Application (ICDSCA)**. IEEE, 2021. p. 374-377.

MILMAN, Mário José. Equipamentos para pré-processamento de grãos. **Pelotas: UFPel**, p. 43-44, 2002.

NALDI, Murilo Coelho et al. Efficiency issues of evolutionary k-means. **Applied Soft Computing**, v. 11, n. 2, p. 1938-1952, 2011.

NYABAKO, Tinashe et al. Predicting *Prostephanus truncatus* (Horn)(Coleoptera: Bostrichidae) populations and associated grain damage in smallholder farmers' maize stores: a machine learning approach. **Journal of Stored Products Research**, v. 87, p. 101592, 2020.

OCHANDIO, D et al. Modelling respiration rate of soybean seeds (*Glycine max* (L.)) in hermetic storage. **Journal of Stored Products Research**, v. 74, p. 36-45, 2017.

OLSEN, Jonathan WW et al. Monitoring grain bed conditions during truck transport of soybeans in Brazil. In: **2013 Kansas City, Missouri, July 21-July 24, 2013**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2013. p. 1.

PARAGINSKI, Ricardo Tadeu et al. Qualidade de grãos de milho armazenados em diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 358-363, 2015.

PARK, Chan-Eun et al. Changes in physicochemical characteristics of rice during storage at different temperatures. **Journal of stored products research**, v. 48, p. 25-29, 2012.

PARVIN, Sazia; GAWANMEH, Amjad; VENKATRAMAN, Sitalakshmi. Optimised sensor based smart system for efficient monitoring of grain storage. In: **2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)**. IEEE, 2018. p. 1-6.

PATINO, Marco TO et al. Analysis and forecast of the storage needs of soybeans in Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 33, p. 834-843, 2013.

PATRÍCIO, Diego Inácio; RIEDER, Rafael. Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 153, p. 69-81, 2018.

PEREIRA, Pedro Silvério Xavier et al. Percentage of corn grain losses in roads transport based on weight of loads. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 37, p. 1-10, 2019.



RIPOLL, Fernando Gastal. **Proposta de uma análise logística no agronegócio como fator competitivo para a distribuição e comercialização da soja em grão no Estado de Mato Grosso**. Universidade de Brasília. Dissertação, 2010.

SANTOS, Silmara Bispo dos et al. Perda de matéria seca em grãos de milho armazenados em bolsas herméticas. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 674-682, 2012.

SINDWANI, Aseem et al. Prediction and Monitoring of stored food grains health using IoT Enable Nodes. In: **2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)**. IEEE, 2020. p. 516-522.

SMANIOTTO, Thaís Adriana Souza et al. Isotermas e calor latente de dessorção dos grãos de milho da cultivar AG 7088. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 11, n. 3, p. 312-322, 2012.

TAHER, Hernán Ignacio et al. Predicting soybean losses using carbon dioxide monitoring during storage in silo bags. **Journal of stored products research**, v. 82, p. 1-8, 2019.

UBHI, Gagandeep Singh; SADAKA, Sammy. Temporal valuation of corn respiration rates using pressure sensors. **Journal of Stored Products Research**, v. 61, p. 39-47, 2015.

USDA. Economic Research Service (2019). Disponível em: <<https://www.ers.usda.gov>>.

WILHELMI, Christopher. **Assessing grain trailer and soybean conditions during transport from harvest to first storage in Sinop, Mato Grosso, Brazil**. 2014. 125 f. Dissertation (Master of Science in Agricultural and Biological) - College of the University of Illinois, Illinois.

ZHANG, Shuai-Bing et al. A site-directed CO<sub>2</sub> detection method for monitoring the spoilage of stored grains by insects and fungi in Chinese horizontal warehouses. **Journal of Stored Products Research**, v. 59, p. 146-151, 2014.