

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

VITOR SANT'ANA LOPES BATISTA

**OZÔNIO EM GRÃOS DE GERGELIM: SATURAÇÃO, CINÉTICA DE
DECOMPOSIÇÃO E CONTROLE DE FUNGOS EM DIFERENTES
CONCENTRAÇÕES**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2023**

VITOR SANT'ANA LOPES BATISTA

**ÔZÔNIO EM GRÃOS DE GERGELIM: SATURAÇÃO, CINÉTICA DE
DECOMPOSIÇÃO E CONTROLE DE FUNGOS EM DIFERENTES
CONCENTRAÇÕES**

Relatório final, apresentado à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências para obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

Orientador: Ernandes Rodrigues de Alencar
Coorientadores: Marcus Vinicius Assis Silva
Eugênio P. Edmundo Siteo

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2023**

VITOR SANT'ANA LOPES BATISTA

**ÔZÔNIO EM GRÃOS DE GERGELIM: SATURAÇÃO, CINÉTICA DE
DECOMPOSIÇÃO E CONTROLE DE FUNGOS EM DIFERENTES
CONCENTRAÇÕES**

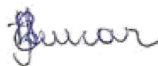
Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências, para obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

APROVADO: 05 de julho de 2023.

Assentimento:



Vitor Sant'Ana Lopes Batista
Autor



Ernandes Rodrigues de Alencar
Orientador

**À minha mãe, que sempre me apoiou
independente da dificuldade.
Ao meu falecido pai, que sempre me inspirou.
À toda a minha família por estar sempre presente.
Aos amigos que me acompanharam nessa jornada.**

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Marise, que me deu a vida, educação, alimento e todo o suporte para chegar aqui. Todos os passos que dei até hoje foram com ela e para ela.

Ao meu falecido pai, Alexandre, que enquanto esteve em vida comigo, me deu educação, alimento e todo o suporte possível. Quando se foi, serviu ainda mais como fonte de inspiração para que eu chegasse até aqui.

Aos meus familiares, por todo o suporte concedido e por sempre acreditarem no meu potencial. Em especial à tia Cláudia, por me aceitar em sua casa e me auxiliar nos momentos difíceis e ao tio Joaquim, que me adotou como filho e me forneceu amor e suporte.

Às minhas irmãs de sangue e de alma, Rayanne e Raissa, por tudo que vivemos.

Aos meus primos Olga, Cléverson e Dudu por terem me acolhido no momento em que mais necessitei durante a graduação e por terem me apresentado o Rogério, meu querido e amado gato preto.

À minha avó, Daisy e meus tios Adriana, Cristina e Eduardo, pelo suporte e apoio, mesmo que distantes.

Aos meus amigos, em especial Gabriel Máximo e Estéfane Borges, que estiveram ao meu lado durante toda a trajetória. E também aos amigos que fiz pelo caminho: Pedro Bira, Noemi, Letícia, Jean, Vinícius, João Melo, Nayla, Larissa, Letycia, Laís, Vanessa, Rafaella e companhia.

Aos amigos que fiz em Campo Grande, em Paulínia e em todas as outras cidades em que estive e me acolheram nos momentos de mudança.

Aos meus amigos do PET.EAA que me acolheram na Engenharia Agrícola e Ambiental e tanto me ensinaram. Ao ex-tutor e amigo, Alisson Borges, pelos conselhos.

Ao Interact e Rotaract Club de Viçosa que me moldaram como pessoa e profissional, fazendo parte da construção da minha índole e dos meus valores.

Aos amigos do laboratório de pós-colheita, pelo auxílio nos experimentos e projetos. Em especial ao Eugênio e ao Marcus que também me auxiliaram como coorientadores.

À professora Lêda e ao professor Ernandes pela oportunidade de ingressar no laboratório de pós-colheita e por terem me orientado até aqui.

“Um trabalho te dá um propósito e um significado. A vida é vazia sem ambos.”.
(Stephen Hawking)

RESUMO

BATISTA, Vitor Sant'Ana Lopes, Universidade Federal de Viçosa, julho de 2022. **Aplicação de gás ozônio em grãos de gergelim: Saturação, cinética de decomposição e controle de fungos em diferentes concentrações.** Orientador: Ernandes Rodrigues de Alencar. Coorientadores: Marcus Vinícius de Assis Silva e Eugénio da Piedade Edmundo Siteo.

A presença de fungos no gergelim (*Sesamum indicum* L.) armazenado pode causar rápida deterioração dos grãos, reduzindo sua qualidade e causando alterações em suas características fisiológicas. Além disso, algumas espécies de fungos podem produzir toxinas nocivas aos seres humanos e animais, como é o caso do *Aspergillus flavus*. O combate aos fungos em grãos armazenados em geral é feito com o uso de produtos químicos, que possuem elevado valor e podem deixar resíduos prejudiciais à saúde humana. Deste modo, o ozônio surge como tecnologia promissora no controle destes microrganismos, uma vez que é um poderoso agente oxidante, capaz de destruir a parede celular dos fungos e impedir sua proliferação. Diante disso, objetivou-se com este trabalho (i) determinar a concentração e o tempo de saturação do ozônio, (ii) caracterizar a cinética de decomposição e a meia-vida do ozônio, (iii) avaliar a eficiência no controle fúngico total e aflatoxigênicos e (iv) avaliar o efeito nas características físico-químicas dos grãos. Para a aplicação de O₃, amostras de 2,0 kg de grãos de gergelim com teor de água de 5,0% g 100 g⁻¹, contendo apenas a infecção fúngica natural foram acondicionados em um protótipo de PVC (0,15 x 0,30 m) dotado de um plenum inferior que possibilitava a entrada do gás e sua distribuição por completo na massa de grãos. As concentrações utilizadas foram de 5,0 mg L⁻¹, 10,0 mg L⁻¹ e 15,0 mg L⁻¹ com um fluxo de 2,0 L min⁻¹ em um período de exposição de 9 horas, tempo necessário para atingir o tempo de saturação. A meia-vida foi determinada avaliando o decaimento do ozônio em intervalos regulares por 15 minutos. A quantificação dos fungos foi feita pelo método do plaqueamento direto, utilizando os meios ágar batata-dextrose (BDA) e *Aspergillus flavus* and *parasiticus* agar (AFPA) para quantificar a presença de fungos totais e potencialmente aflatoxigênicos respectivamente. Em relação a qualidade físico-química dos grãos, foram analisados o teor de água, condutividade elétrica e a cor após cada processo de ozonização, comparando com os grãos de gergelim em condição de testemunha. Cada uma das análises de controle fúngico e físico-químicas foram submetidas ao Teste de Tukey a nível 5% de probabilidade. Os tempos de saturação para as concentrações de 5,0 mg L⁻¹, 10,0 mg L⁻¹ e 15,0 mg L⁻¹ foram 391 min, 267 min e 234 min, respectivamente, já as concentrações de saturação foram 2,3 mg L⁻¹, 6,0 mg L⁻¹ e 8,0 mg L⁻¹ seguindo a mesma ordem. Além disso, o tempo de meia-vida encontrado foi de 2,6 min. Com relação ao controle fúngico total, apenas a concentração de 15,0 mg L⁻¹ foi efetiva no controle de fungos totais. Em

relação ao controle de fungos potencialmente aflatoxigênicos, todas as concentrações apresentaram controles significativos. O ozônio não promoveu alterações significativas no teor de água e na condutividade elétrica. O ozônio também não provocou variação significativa na luminosidade do gergelim. Entretanto, houveram alterações significativas na saturação de cor e na tonalidade. Verificou-se também que com a elevação da concentração de ozônio, o parâmetro de diferença de cor também aumenta.

Palavras-chave: *Aspergillus sp.*; *Sesamum indicum L.*; Ozonização.

ABSTRACT

BATISTA, Vitor Sant'Ana Lopes, Universidade Federal de Viçosa, julho de 2022. **Application of ozone gas on sesame seeds: Saturation, kinetics of decomposition and fungal control at different concentrations.** Adviser: Ernandes Rodrigues de Alencar. Co-adviser: Marcus Vinícius de Assis Silva and Eugénio da Piedade Edmundo Siteo.

The presence of fungi in stored sesame seeds (*Sesamum indicum* L.) can cause rapid deterioration of the grains, reducing their quality and causing changes in their physiological characteristics. Moreover, some fungal species can produce toxins harmful to humans and animals, such as *Aspergillus Flavus*. The control of fungi in stored grains is generally achieved through the use of chemical products, which are expensive and can leave harmful residues detrimental to human health. Therefore, ozone emerges as a promising technology for controlling these microorganisms, as it is a powerful oxidizing agent capable of destroying the fungal cell wall and preventing their proliferation. In this study, the objectives were (i) to determine the concentration and saturation time of ozone, (ii) to characterize the decomposition kinetics and half-life of ozone, (iii) to evaluate the efficiency in total fungal and aflatoxin-controlling, and (iv) to assess the effect on the physicochemical characteristics of the grains. For the application of O₃, samples of 2.0 kg of sesame seeds with a moisture content of 5.0% wb (wet basis) and containing only natural fungal infection were placed in a PVC prototype (0.15 x 0.30 m) equipped with a lower plenum that allowed the gas to enter and distribute evenly throughout the grain mass. The concentrations used were 5.0 mg L⁻¹, 10.0 mg L⁻¹, and 15.0 mg L⁻¹, with a flow rate of 2.0 L min⁻¹ over an exposure period of 9 hours, which was necessary to reach the saturation time. The half-life was determined by evaluating the decay of ozone at regular intervals for 15 minutes. The quantification of fungi was performed using the direct plating method, using Potato Dextrose Agar (PDA) and Aflatoxin-Producing Fungi Agar (AFPA) to quantify the presence of total fungi and potentially aflatoxigenic fungi, respectively. Regarding the physicochemical quality of the grains, the water content, electrical conductivity, and color were analyzed after each ozonation process, comparing them with the control condition of sesame seeds. Each of the fungal control and physicochemical analyses was subjected to Tukey's test at a 5% level of probability. The saturation times for the concentrations of 5.0 mg L⁻¹, 10.0 mg L⁻¹, and 15.0 mg L⁻¹ were 391 minutes, 267 minutes, and 234 minutes, respectively, while the saturation concentrations were 2.3 mg L⁻¹, 6.0 mg L⁻¹, and 8.0 mg L⁻¹, following the same order. Furthermore, the half-life time found was 2.6 minutes. As for total fungal control, only the concentration of 15.0 mg L⁻¹ was effective in controlling total fungi. Regarding the control of potentially aflatoxigenic fungi, all concentrations showed significant

controls. Ozone did not cause significant changes in water content and electrical conductivity. Ozone also did not significantly affect the brightness of the sesame seeds. However, there were significant changes in color saturation and hue. It was also observed that with increasing ozone concentration, the color difference parameter also increased.

Keywords: *Aspergillus sp.*; *Sesamum indicum* L.; Ozonation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2.1 Origem e caracterização dos grãos de gergelim	14
2.2 Obtenção e quantificação do gás ozônio	14
2.3 Ozonização dos grãos de gergelim	14
2.3.1 Saturação do gergelim com ozônio.....	15
2.3.2 Cinética de decomposição do ozônio em gergelim.....	16
2.4 Eficácia do ozônio no controle de fungos em gergelim.....	17
2.5 Efeito do ozônio na qualidade do gergelim	17
2.5.1 Teor de água.....	18
2.5.2 Condutividade elétrica	18
2.5.3 Coloração.....	18
2.6. Análises estatísticas.....	19
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
3.1 Cinética de saturação do gás ozônio nas amostras de gergelim	20
3.2 Cinética de decomposição do gás ozônio nas amostras de gergelim	22
3.3 Eficácia do controle de fungos em gergelim.....	23
3.4 Efeito do ozônio na qualidade do gergelim	26
4 CONCLUSÕES.....	29
REFERÊNCIA.....	30

1 INTRODUÇÃO

O gergelim (*Sesamum indicum L.*), pertencente à família *Pedaliaceae*, é uma oleaginosa cujo principal produto são suas sementes, as quais possuem tamanho reduzido, forma achatada e colorações variadas (COSTA; GONDIM; ARAÚJO, 2007). Esta cultura destaca-se por ser uma das oleaginosas mais antigas usadas pela humanidade, originária da África, onde se concentram a maioria de suas espécies silvestres (SILVA LIMA *et. al.*, 2021).

O gergelim foi introduzido no Brasil por volta do século XVI, na região nordeste pelos portugueses, sendo utilizada tradicionalmente para consumo local (ARRIEL *et. al.*, 2007). A espécie possui distribuição tropical e subtropical devido a sua resistência à seca e adaptabilidade em condições adversas de solo e clima (SILVA LIMA *et. al.*, 2021). O gergelim passou a ser explorado na região nordeste a partir de 1986, quando houve grande redução no cultivo de algodão. Entretanto, o gergelim já é explorado desde a década de 1950 na região centro-sul do Brasil (ARRIEL *et. al.*, 2007).

A razão econômica para se cultivar o gergelim é principalmente a extração de óleo de suas sementes, as quais possuem teores de óleo superiores a outras culturas como soja e girassol. Entretanto, também é uma cultura rica em quantidade de vitaminas, em especial do complexo B, e outros constituintes minerais como cálcio, fósforo, potássio e magnésio, o que a qualifica para o consumo humano (COSTA; GONDIM; ARAÚJO, 2007).

Atualmente, o gergelim é cultivado em mais de 71 países e em 2017, sua área global de cultivo foi em torno de 10.245.246 hectares, o que totalizou uma produção de 5,9 milhões de toneladas (SHARABY; BUTOVCHENKO, 2019). No Brasil, o aumento na produção de gergelim entre as safras de 2020/2021 e 2021/2022 chegou a 41,4%, totalizando uma produção de 80,2 mil toneladas (GOMES *et. al.*, 2022).

O governo brasileiro tem incentivado, desde o lançamento do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB) (MAINTINGUER *et. al.*, 2022), a produção de matérias primas para a produção de biodiesel, inclusive por parte da agricultura familiar. A participação da agricultura familiar no PNPB atingiu em 2015 um percentual de 26%. Dentre as matérias primas mais fornecidas pela agricultura familiar, destacaram-se a soja e o gergelim (MAINTINGUER *et. al.*, 2022).

Assim como os demais produtos agrícolas, a disponibilidade dos grãos e sementes depende bastante da produção e do armazenamento. A conservação correta é extremamente importante do ponto de vista econômico e social, uma vez que não é possível a melhoria da qualidade de um produto agrícola depois de colhido, mesmo sob condições ótimas de armazenamento (ALMEIRA; FONSECA; GOUVEIA, 1999). O armazenamento de grãos depende de diversos fatores, entre eles destaca-se o teor de umidade, o qual deve se encontrar em uma faixa adequada para cada produto, visando reduzir a perda de matéria seca por respiração e incidência de fungos (ALMEIRA; FONSECA; GOUVEIA, 1999).

O armazenamento inadequado de oleaginosas pode ocasionar aumento de acidez, pela formação de ácidos graxos devido a decomposição dos glicerídeos. Esse processo ainda implica em perda de cor do produto, incidência de fungos (GOMES; DE LIMA-PRIMO; SMIDERLE, 2017) e redução de características fisiológicas como o vigor, quando se trata de sementes (ALMEIDA *et. al.*, 2010).

A identificação dos patógenos, como o caso dos fungos, nas sementes também é essencial para a recomendações de técnicas de manejo. Referente ao gergelim, diversas espécies fúngicas estão associadas à sua deterioração, tais como *Aspergillus sp.*, *Fusarium sp.* e *Penicillium sp.* (GOMES; LIMA-PRIMO; SMIDERLE, 2017; SILVA, *et. al.*, 2021). Em estudo realizado por Faiad, Wetzel e Miranda (2002), sementes de gergelim de diferentes regiões do país foram armazenadas por um período de 5 a 9 anos e então a incidência de fungos foi avaliada nos germoplasma-sementes de gergelim. Inúmeros gêneros de fungos foram detectados nas amostras, com destaque para o grupo *Aspergillus*.

Em geral, o controle destes patógenos em sementes é realizado pelo emprego de produtos químicos, que, além de possuírem custos elevados, também trazem riscos toxicológicos aos consumidores. Não obstante, o uso frequente destes químicos pode causar o aumento da resistência dos organismos ao princípio ativo (RODRIGUES *et. al.*, 2021). Deste modo, a utilização de ozônio aparece como uma solução alternativa para o controle de insetos e fungos em produtos armazenados, uma vez que o mecanismo de ação do gás ozônio acontece pela oxidação dos constituintes lipídicos presentes nas células desses microrganismos (BARBARA; BALLARIS, 2021). Portanto, objetivou-se com este trabalho (i) determinar a concentração e o tempo de saturação do ozônio, (ii) caracterizar a cinética de decomposição e a meia-vida do ozônio, (iii) avaliar a eficiência

no controle fúngico total e aflatoxigênico e (iv) avaliar o efeito nas características físico-químicas dos grãos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado no Laboratório de Pós-Colheita da Área de Armazenamento, do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), da Universidade Federal de Viçosa, Campus Viçosa, Viçosa-MG.

2.1 Origem e caracterização dos grãos de gergelim

Para o experimento foram utilizados grãos de gergelim (*Sesamum indicum L.*) obtidos no comércio local. Os grãos foram armazenados em embalagens de ráfia e colocados em câmaras frias à temperatura de 5 °C, durante a realização do experimento. Na caracterização inicial dos grãos de gergelim foram determinados o teor de água (g 100 g⁻¹), os parâmetros de coloração e sua condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$).

2.2 Obtenção e quantificação do gás ozônio

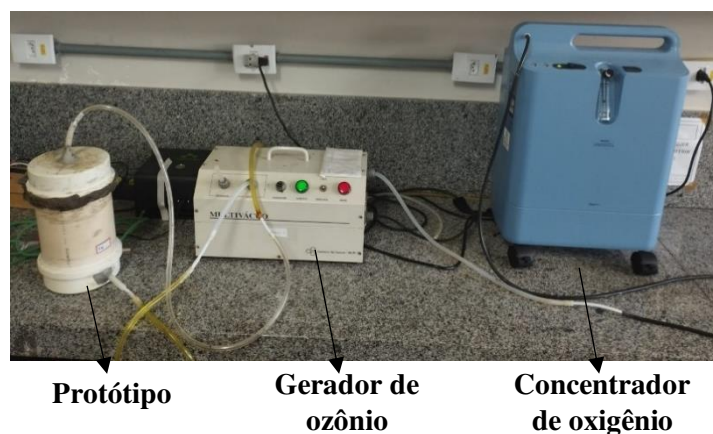
O gás ozônio (O₃) foi obtido utilizando-se um gerador de ozônio baseado no método de descarga por barreira dielétrica (DBD) (desenvolvido pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP), alimentado com oxigênio comprimido (pureza de 99,99%) e com vazão 2 L min⁻¹, fornecido por um concentrador de oxigênio (Philips Respironics, Murrysville, Pensilvânia, EUA). A vazão foi determinada, utilizando-se um medidor de vazão volumétrica modelo MF5700 (Siargo Ltd, Chengdu, Sichuan, China). O ozônio gerado foi quantificado pelo método iodométrico (RAKNESS *et. al.*, 1996).

2.3 Ozonização dos grãos de gergelim

Na ozonização do gergelim, foram utilizadas amostras de 2,0 kg de grãos, acondicionadas em protótipo de PVC (0,15 m de diâmetro e 0,30 m de altura). O protótipo era dotado de uma chapa perfurada, instalada a 0,05 m da base, visando promover a sustentação dos grãos e a passagem do gás pela massa. Deu-se então a aplicação do ozônio por meio de tubulação ao fundo do protótipo. A coleta do gás para quantificação foi realizada por meio de uma tubulação ao topo do protótipo.

As dimensões do protótipo foram definidas de acordo com a norma (“EN 1991-4: *Eurocode 1: Actions on structures - Part 4: Silos and tanks*”, 2006), de forma a evitar escoamento preferencial pelas paredes laterais. O gás ozônio foi aplicado nos grãos de gergelim nas concentrações de entrada de $5,0 \text{ mg L}^{-1}$, $10,0 \text{ mg L}^{-1}$ e $15,0 \text{ mg L}^{-1}$ em duplicata para cada uma das concentrações. A foto do esquema utilizado para a ozonização está disposta na Figura 1.

Figura 1 - Esquema utilizado para a ozonização no protótipo



Fonte: Autor.

2.3.1 Saturação do gergelim com ozônio

Para determinar o tempo e a concentração de saturação do ozônio e posteriormente determinar a cinética de saturação, a concentração residual do gás ozônio, no topo do protótipo, foi quantificada em intervalos regulares de 10 e 20 minutos. O tempo de saturação da massa de grãos foi atingido quando a concentração residual do ozônio se manteve constante. Este procedimento foi realizado para cada uma das concentrações de ozônio propostas.

O ozônio residual foi direcionado a um frasco Erlenmeyer (125 mL) contendo solução de iodeto de potássio (KI) 2%, a fim de permitir a reação do ozônio com o iodo e posteriormente quantificá-lo indiretamente com o uso de solução de tiosulfato de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$). A coleta de gás ozônio foi realizada a pressão atmosférica, evitando-se interferência na vazão do gás.

A Equação 1 foi ajustada aos dados de concentração residual na saída do protótipo. Após o ajuste das equações, o tempo de saturação foi obtido através da Equação 2 (VENEGAS; HARRIS; SIMON, 1998).

$$C = a/(1 + e^{-(t-b)/c}) \quad (\text{Equação 1})$$

$$t_{\text{sat}} = b+2c \quad (\text{Equação 2})$$

Em que:

C - Concentração do gás O₃ (mg L⁻¹);

t - Tempo (min);

a, b e c - Parâmetros de ajuste da equação;

t_{sat} - Tempo de saturação (min).

2.3.2 Cinética de decomposição do ozônio em gergelim

Para estudar a cinética de decomposição do ozônio aplicado em fluxo nos grãos de gergelim, amostras de 2,0 kg de foram expostas ao gás na concentração de 15 mg L⁻¹. Com a amostra saturada, a aplicação de ozônio foi então interrompida e a entrada e saída do protótipo foram vedadas. Ao vedar a entrada e saída, o gás presente no ar intergranular fica sujeito à decomposição espontânea.

Dados da concentração residual do ozônio foram monitorados em intervalos regulares de tempo de até 15 min. Após cada intervalo, gás oxigênio era injetado na entrada do protótipo na vazão de 2,0 L min⁻¹. Esta injeção de oxigênio é importante para transportar o ozônio presente no ar intergranular e possibilitar a quantificação deste na saída. Após a quantificação, o ozônio foi injetado novamente no protótipo, visando alcançar novamente a saturação e então o procedimento descrito foi repetido para novos intervalos de tempo a cada 2 minutos. Dessa forma, foi possível obter os dados de decaimento da concentração de ozônio em relação ao tempo (SILVA, *et. al.*, 2019). Estes dados foram ajustados a modelos de cinética de reação, visando a determinação da constante de decomposição e o tempo de meia-vida do ozônio (WRIGHT, 2004).

O coeficiente de determinação (R²) foi utilizado como parâmetro para escolha do modelo cinético mais adequado. A partir deste modelo, que forneceu o melhor ajuste, a

constante da taxa de decomposição (k) foi utilizada para o cálculo do tempo de meia vida ($t_{1/2}$) (Tabela 1).

Tabela 1 - Modelos cinéticos de decomposição de ordem zero, primeira e segunda ordem

Ordem	Equação diferencial	Equação integrada e linearizada	Meia-vida
0	$dC/dt = -k$	$C = C_0 - kt$	$t_{1/2} = \frac{C_0}{2k}$
1	$dC/dt = -kC$	$\ln C = \ln C_0 - kt$	$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k}$
2	$dC/dt = -kC^2$	$1/C = 1/C_0 + kt$	$t_{1/2} = \frac{1}{k C_0}$

C = Concentração de O_3 ($mg L^{-1}$); t = Tempo (min); k = Constante da taxa de reação de decomposição (min^{-1}); C_0 = Concentração de O_3 inicial ($mg L^{-1}$); $t_{1/2}$ = meia vida.

Fonte: WRIGHT (2004).

2.4 Eficácia do ozônio no controle de fungos em gergelim

Nessa etapa, foram adotadas concentrações de entrada de, $5,0 mg L^{-1}$, $10,0 mg L^{-1}$ e $15,0 mg L^{-1}$, com tempo de exposição de 9 horas, e a amostra testemunha. Para avaliar a eficácia do ozônio no controle de fungos em gergelim, foi realizado plaqueamento direto dos grãos (PITT; HOCKING, 2009) em ágar batata-dextrose (BDA), para fungos totais, e *Aspergillus flavus* and *parasiticus* agar (AFPA), para fungos potencialmente aflatoxigênicos, sendo 15 grãos por placa em duplicata, para cada amostra. Os resultados foram expressos em porcentagem de grãos infectados por fungos.

2.5 Efeito do ozônio na qualidade do gergelim

O gás ozônio foi aplicado nos grãos de gergelim nas concentrações de entrada de $5,0 mg L^{-1}$, $10,0 mg L^{-1}$ e $15,0 mg L^{-1}$, totalizando 9 horas de tempo de exposição. Foram determinados o teor de água, condutividade elétrica e a cor. Amostras de cada lote foram submetidas às análises físico-químicas em triplicata de acordo com as recomendações do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008).

2.5.1 Teor de água

O teor de água foi determinado de acordo com o método descrito pela ASAE - American Society of Agricultural Engineers (2000), em uma estufa com circulação de ar forçado por 103 °C por 72 horas. Os resultados foram expressos em base úmida (g 100 g⁻¹).

2.5.2 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica também foi determinada de acordo com o método sugerido por Vieira (1994), em que 50 grãos por amostra foram previamente pesados em uma balança com precisão de 0,0001 g, em triplicata, foram embebidos em 75 mL de água destilada e levados a uma câmara climática a 25 °C, por 24 horas. Após este período a condutividade elétrica da solução foi medida, utilizando-se um condutivímetro de bancada (modelo MCA-150, Tecnopon, Piracicaba, Brasil). Os resultados foram expressos em $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$.

2.5.3 Coloração

A determinação de cor foi avaliada em um colorímetro CR-400 (Konica Minolta) com leitura direta da refletância do L* (luminosidade: eixo preto-branco), a* (eixo verde-vermelho) e b* (eixo azul-amarelo). Com os valores destas coordenadas foi possível calcular os parâmetros relacionados a saturação de cor ou croma (Equação 3), Variação total de cor (ΔE , Equação 4) e tonalidade de cor ou ângulo hue (h*) (Equação 5).

$$Cr = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (\text{Equação 3})$$

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (\text{Equação 4})$$

$$h^* = \arctan(b^*/a^*) \quad (\text{Equação 5})$$

Em que:

C_r - Intensidade de cor particular (%);

ΔE - Diferença total considerando todos os eixos de cor (adm);

h^* - Estado puro da cor, associado a onda dominante (graus);

2.6. Análises estatísticas

Foi adotado Delineamento Inteiramente Casualizado, com três repetições. Na etapa que trata da saturação, foram adotadas três concentrações de entrada do gás (5,0 mg L⁻¹, 10,0 mg L⁻¹ e 15,0 mg L⁻¹). Na etapa que trata de decomposição do ozônio em gergelim, foi adotada apenas a maior concentração (15,0 mg L⁻¹). Na análise desses dados, foi utilizada análise de regressão, no software SigmaPlot® versão 10.0 (SYSTAT SOFTWARE Inc, 2006). Na avaliação da eficácia do ozônio no controle de fungos e dos possíveis efeitos na qualidade do produto, foi utilizado o teste de Tukey ao nível 5% de probabilidade, comparando cada uma das concentrações (5,0 mg L⁻¹, 10,0 mg L⁻¹ e 15,0 mg L⁻¹) com a testemunha, a qual não foi aplicado nenhum tratamento.

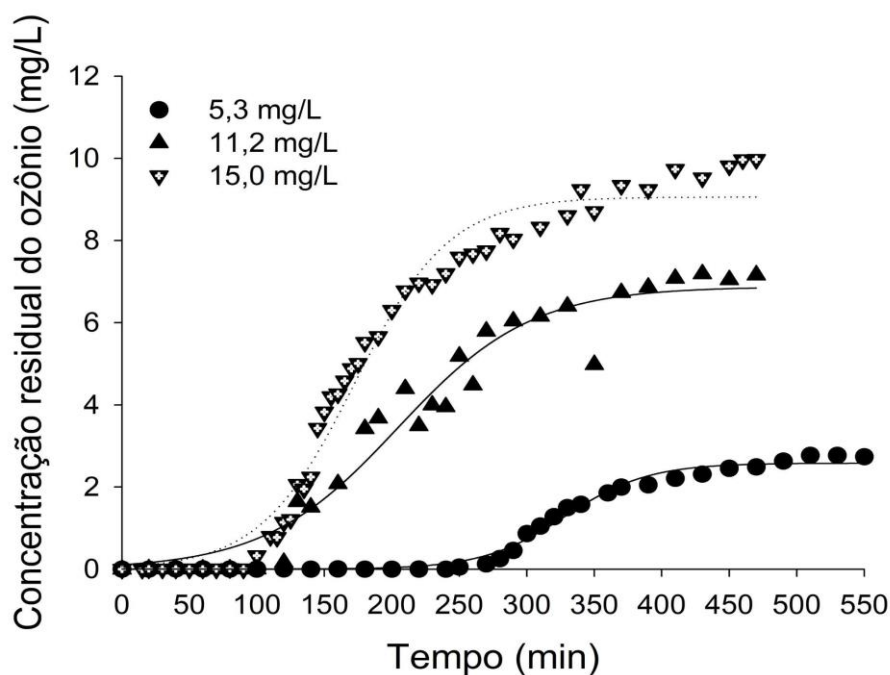
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Cinética de saturação do gás ozônio nas amostras de gergelim

De acordo com Kells *et. al* (2001) e Mendez *et. al.* (2003), o gás ozônio escoar pela massa de grãos transcorrendo por 2 fases. Na primeira fase tem-se alta interação do gás ozônio com sítios presentes na massa de grãos. Essa interação faz com que o gás ozônio se degrade rapidamente. Conforme estes sítios na massa de grãos reagem com o gás ozônio, a quantidade de ozônio degradado por reação em sítios é reduzida, de tal modo que esse passa a escoar pela massa de grãos com menor taxa de degradação.

A Figura 2 representa os resultados referentes à saturação da massa de grãos de gergelim com gás ozônio, quando adotadas as concentrações de entrada (C_0) em 5,0 mg L⁻¹, 10,0 mg L⁻¹ e 15,0 mg L⁻¹, na vazão de 2 L min⁻¹.

Figura 2 – Concentração residual do ozônio (mg L⁻¹) em função do tempo (min) durante o processo de saturação dos grãos de gergelim, para as concentrações de entrada de 5,0 mg L⁻¹, 10,0 mg L⁻¹ e 15,0 mg L⁻¹, com uma vazão de 2 L min⁻¹



Fonte: Autor.

A Tabela 2 apresenta as equações ajustadas a concentração de ozônio residual para cada concentração de entrada. O tempo de saturação foi calculado utilizando-se a Equação

2 e também está disposto na Tabela 2. Sendo possível identificar a relação inversamente proporcional de concentração de entrada com o tempo de saturação, conforme tendência observada por outros autores como Dos Santos *et. al.* (2007), De Oliveira *et. al.* (2020), Silva, *et. al.* (2019) e Alencar *et. al.* (2021) e explicada por Kells *et. al.* (2001) e Mendez *et. al.* (2003). Os tempos de saturação para as concentrações de entrada de 5,0 mg L⁻¹, 10,0 mg L⁻¹ e 15,0 mg L⁻¹ foram iguais a 391,1 min, 267,2 min e 243,4 min, respectivamente.

Tabela 2 - Equações de regressão ajustadas e respectivos coeficientes de determinação (R²), para concentração residual do ozônio (mg L⁻¹) em função do tempo (min) de exposição em grãos de gergelim, para as concentrações de entrada de 5,0 mg L⁻¹, 10,0 mg L⁻¹ e 15,0 mg L⁻¹, com uma vazão de 2 L min⁻¹

Concentração de entrada (mg L ⁻¹)	Equações ajustadas	R ²	EPE	t _{sat} (min)	C _{sat} (mg L ⁻¹)	C _{sat} / C ₀
5,0	$C = \frac{2,5631}{1 + e^{-\frac{(t-328,7331)}{31,1892}}}$	0,985	0,139	391,151	2,258	0,452
10,0	$C = \frac{6,7732}{1 + e^{-\frac{(t-190,7087)}{38,2361}}}$	0,993	0,322	267,181	5,966	0,596
15,0	$C = \frac{9,0421}{1 + e^{-\frac{(t-173,1401)}{35,1291}}}$	0,980	0,522	243,398	7,964	0,531

C – Concentração de ozônio estimada (mg L⁻¹); R² - Coeficiente de determinação; EPE - Erro Padrão da Estimativa; t_{sat} - Tempo de Saturação; C_{sat} – Concentração de saturação.

Fonte: Autor.

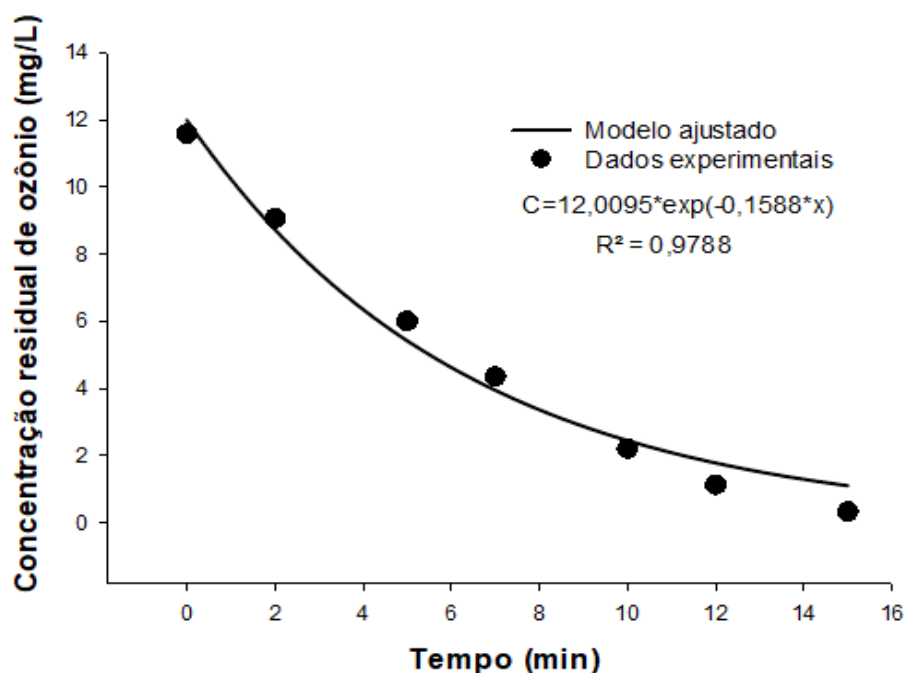
Ressalta-se que para a concentração de 5,0 mg L⁻¹, a concentração residual de ozônio começou a ser detectada a partir de 270 min e sua concentração de saturação (C_{sat}) foi de 2,3 mg L⁻¹ (Figura 2 e Tabela 2). Já para a concentração de 10,0 mg L⁻¹, foi necessário 120 min para que a concentração residual de ozônio começasse a ser detectada e a concentração de saturação foi de 6,0 mg L⁻¹ (Figura 2 e Tabela 2). Para a concentração de 15,0 mg L⁻¹, a concentração residual de ozônio começou a ser detectada a partir de 90 min, com concentração de saturação de 8,0 mg L⁻¹ (Figura 2 e Tabela 2). Observou-se que quanto maior a concentração de entrada, maior a concentração de saturação. No que se refere a relação entre concentração de saturação e a concentração de entrada (C_{sat}/C_0), obtiveram-se valores iguais a 0,46, 0,60 e 0,53, para as concentrações de entrada de 5,0 mg L⁻¹, 10,0 mg L⁻¹ e 15,0 mg L⁻¹, respectivamente.

Os tempos de saturação observados na Tabela 2 para o gergelim foram maiores que os tempos observados para produtos como milho, amendoim, feijão, milho pipoca, castanha-do-Brasil e quinoa, determinados por Dos Santos *et. al.* (2007), Alencar *et. al.* (2011), Lima *et. al.* (2014), Silva *et. al.* (2019), De Oliveira *et. al.* (2020) e Alencar *et. al.* (2021), respectivamente. Isso pode ser explicado pela concentração inicial de ozônio e também pela constituição química dos grãos. O tempo de saturação obtido também foi maior que a relação de tempos apresentadas para o amendoim por Alencar *et. al.* (2008) e por Roberto *et. al.* (2016).

3.2 Cinética de decomposição do gás ozônio nas amostras de gergelim

A Figura 3 apresenta o decaimento da concentração de ozônio na massa de grãos de gergelim, para a concentração de entrada de 15 mg L⁻¹, assim como a equação que descreve o comportamento e respectivo coeficiente de determinação.

Figura 3 – Concentração residual do ozônio (mg L^{-1}) em função do tempo (min) durante o processo de decomposição do ozônio em massa de grãos de gergelim para a concentração de $15,0 \text{ mg L}^{-1}$, com uma vazão de 2 L min^{-1}



Fonte: Autor.

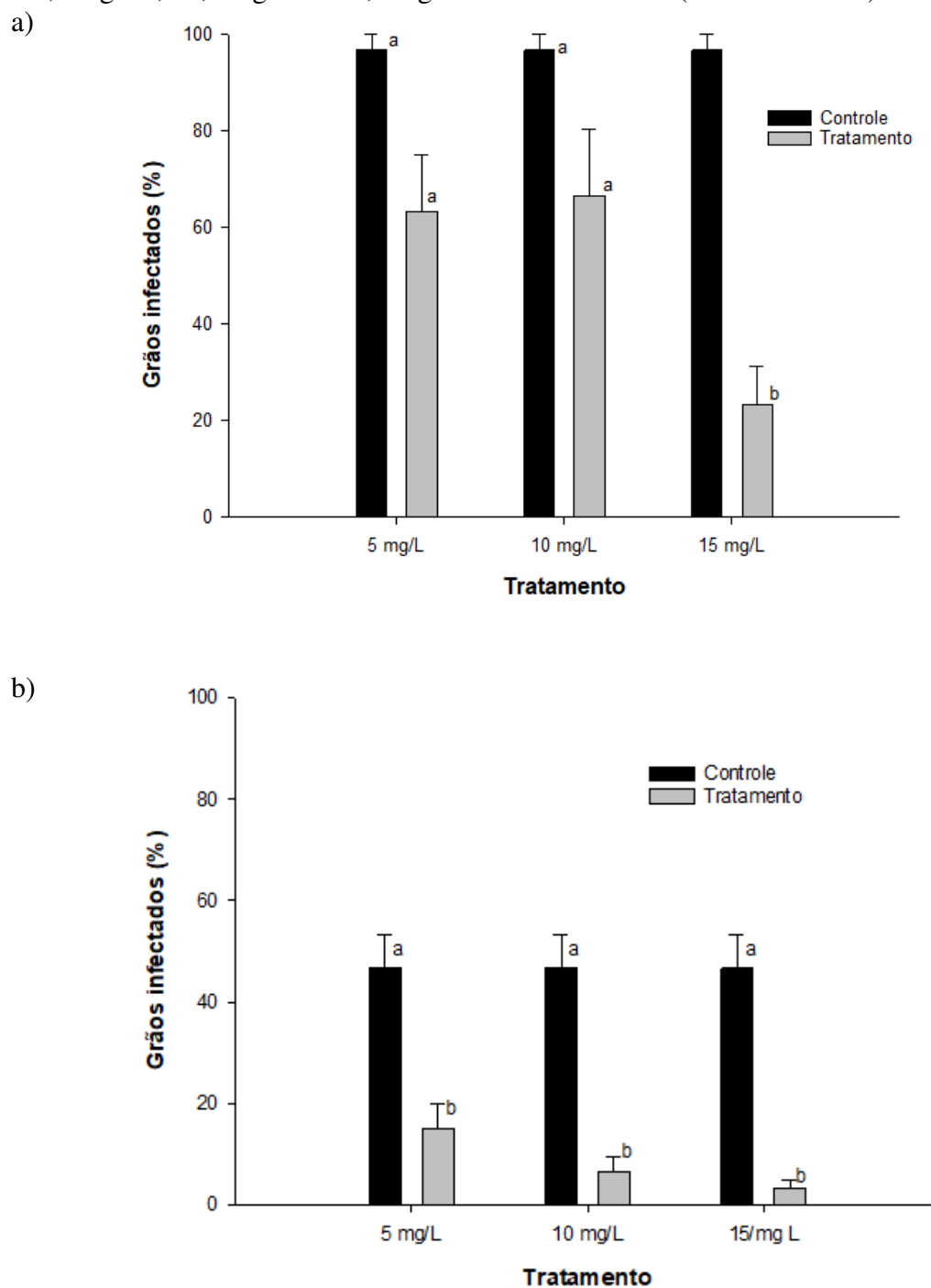
O modelo cinético de primeira ordem apresentou melhor ajuste aos dados de decaimento da concentração de ozônio. A constante da taxa de decomposição (k) foi dada pelo coeficiente angular da equação de regressão. O valor de k encontrado foi de $0,226$ e o tempo de meia vida foi de $2,6$ min.

De acordo com Khadre *et. al.* (2001), na ausência de matéria orgânica, o tempo de meia-vida do ozônio é de 20 a 50 min. Dos Santos *et. al.* (2007) obtiveram $5,57$ min de tempo de meia-vida para milho. Em outro estudo apresentado por Silva *et. al.* (2019), foram definidos tempos de meia-vida de 5 e 6 min para o milho pipoca. Lima *et. al.* (2014) encontraram tempo de meia-vida de $11,2$ min para o feijão fradinho, enquanto que Alencar *et. al.* (2011) obtiveram $7,7$ minutos para amendoim. De Oliveira *et. al.* (2020) observaram tempo de meia vida de $4,20$ min para castanha-do-Brasil.

3.3 Eficácia do controle de fungos em gergelim

Tem-se, nas Figuras 4 e 5, o percentual de grãos infectados por fungos totais (a) e por fungos potencialmente aflatoxigênicos (b) em grãos de gergelim ozonizados nas concentrações de 5,0 mg L⁻¹, 10,0 mg L⁻¹ e 15,0 mg L⁻¹ e testemunha (sem tratamento).

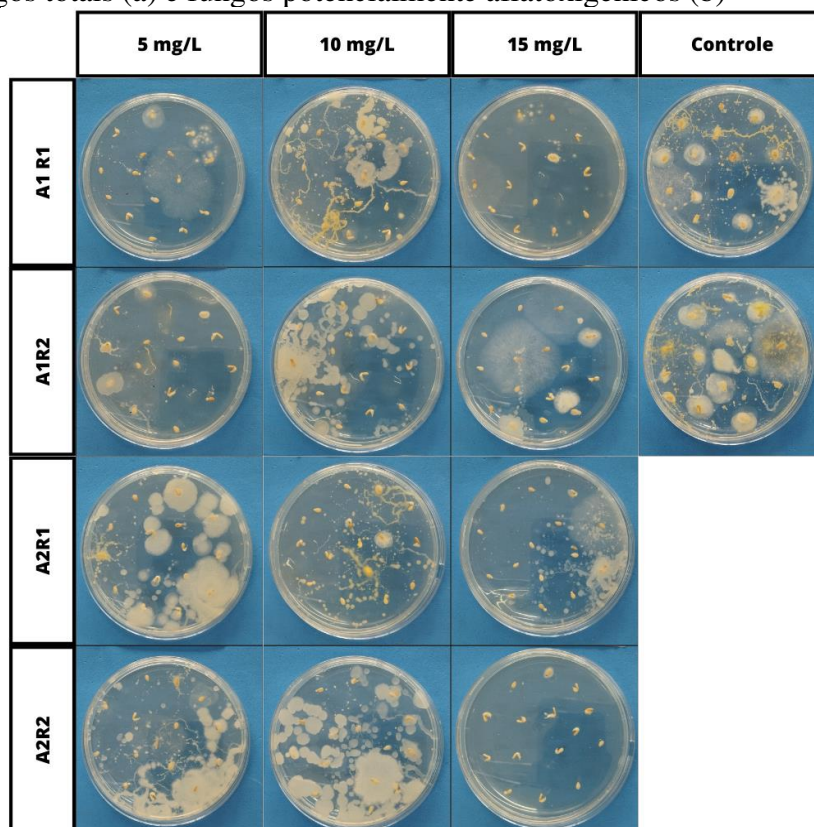
Figura 4 – Percentual de grãos infectados por fungos (fungos totais, a) e por fungos potencialmente aflatoxigênicos (b) em gergelim expostos ao ozônio, nas concentrações de 5,0 mg L⁻¹, 10,0 mg L⁻¹ e 15,0 mg L⁻¹ e na testemunha (sem tratamento)



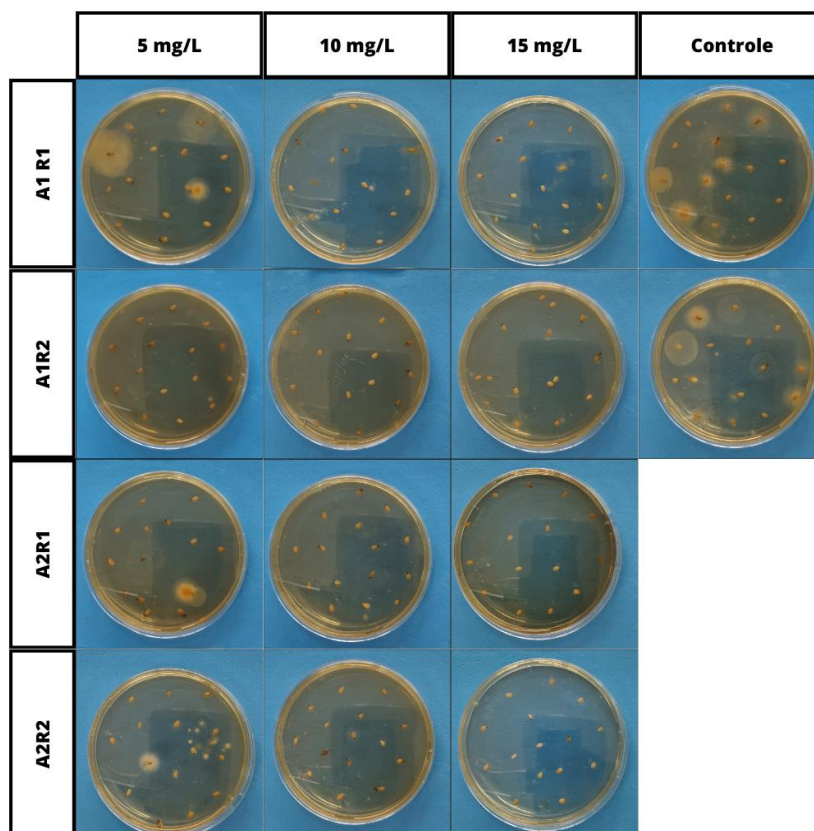
Fonte: Autor.

Figura 5 – Efeito do oxigênio (controle) e ozônio na inativação do fungo de fungos em gergelim: fungos totais (a) e fungos potencialmente aflatoxigênicos (b)

a)



b)



Fonte: Autor.

Para fungos totais (Figuras 4a e 5a), não houve diferença significativa ($p > 0,05$) para as concentrações de 5 mg L^{-1} e 10 mg L^{-1} . Para a concentração de 15 mg L^{-1} houve diferença significativa ($p < 0,05$), com redução de 76% da infecção por fungos. No que se refere aos fungos potencialmente aflatoxigênicos, todas as concentrações de entrada adotadas acarretaram em controle desses microrganismos. Para a concentração de 15 mg L^{-1} , o controle fúngico atingiu 93% de eficiência. Quanto às concentrações de 5 mg L^{-1} e 10 mg L^{-1} , a redução no percentual de infecção foi de 69% e 86%, respectivamente.

Os dados obtidos referente a presença de fungos do gênero *Aspergillus* foram similares aos resultados obtidos por Sánchez *et. al.* (2016), que determinaram o efeito fungicida do ozônio em amendoim. Entretanto, o ozônio foi mais efetivo no controle de fungos potencialmente em gergelim do que em amendoim e híbridos de milho, conforme observado por Alencar *et. al.* (2012) e Ribeiro *et. al.* (2022), respectivamente.

3.4 Efeito do ozônio na qualidade do gergelim

Não houve uma redução significativa ($p > 0,05$) do teor de água dos grãos de gergelim, quando se compararam as médias obtidas nas diferentes concentrações de ozônio e as respectivas testemunhas, que não sofreram nenhum tratamento (Tabela 3). Entretanto, outros autores observaram redução do teor de água de grãos durante a ozonização. Essa tendência foi observada por Alencar *et. al.* (2011a) e Silva (2022), podendo ser explicado pela utilização de oxigênio isento de umidade para a geração do gás, implicando em perda de água nos grãos durante a ozonização.

Tabela 3 - Valores médios de teor de água e condutividade elétrica

Tratamento	Parâmetros de qualidade	
	Teor de água (%) \pm SD	Condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$) \pm SD
Testemunha	$5,04 \pm 0,04a$	$80,38 \pm 6,48a$
$5,0 \text{ mg L}^{-1}$	$4,57 \pm 0,07a$	$91,32 \pm 10,42a$
Testemunha	$5,04 \pm 0,04a$	$80,38 \pm 6,48a$
$10,0 \text{ mg L}^{-1}$	$4,64 \pm 0,00a$	$97,25 \pm 10,51a$
Testemunha	$5,04 \pm 0,04a$	$80,38 \pm 6,48a$
$15,0 \text{ mg L}^{-1}$	$4,48 \pm 0,03a$	$92,10 \pm 4,95a$

SD – Desvio padrão amostral; médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente a um nível de significância de 5% pelo teste de Tukey 5% de probabilidade.

Fonte: Autor.

No que se refere a condutividade elétrica não houve alteração significativa ($p>0,05$) em decorrência da ozonização ($p>0,05$) (Tabela 3). A condutividade elétrica pode ser utilizada para mensurar indiretamente a integridade física dos grãos, de tal modo que conforme o nível de deterioração dos grãos, ao serem imersos em água, liberam íons que podem ser quantificados. Silva (2022) demonstrou que o gás ozônio influencia na condutividade elétrica dos grãos de milho pipoca. Entretanto Alencar *et. al.* (2011a) não evidenciou alteração na condutividade elétrica após a ozonização de grãos de amendoim. Alencar *et. al.* (2021) tão pouco evidenciou alteração na condutividade em grãos de quinoa.

Na Tabela 4, são apresentados os valores médios para luminosidade (L^*), saturação de cor (Cr^*), tonalidade de cor (h^*) e diferença total de cor (ΔE) no gergelim exposto as diferentes concentrações de gás ozônio, bem como a testemunha que não sofreu nenhum tratamento.

Tabela 4 - Valores médios de luminosidade (L^*), saturação de cor (Cr^*), tonalidade de cor (h^*) e diferença total de cor (ΔE)

Tratamento	Parâmetros de qualidade			
	Luminosidade \pm SD	Tonalidade de cor* \pm SD	Croma* \pm SD	Diferença total de cor \pm SD
Testemunha	57,52 \pm 1,71a	78.73 \pm 0,32b	16,14 \pm 0,44a	-----
5,0 mg L ⁻¹	57,57 \pm 1,11a	80.32 \pm 0,05a	15,68 \pm 0,86a	1,30 \pm 0,52
Testemunha	57,52 \pm 1,71a	78.73 \pm 0,32b	16,14 \pm 0,44a	-----
10,0 mg L ⁻¹	55,03 \pm 1,43a	80.54 \pm 0,30a	14,12 \pm 0,68b	3,27 \pm 1,52
Testemunha	57,52 \pm 1,71a	78.73 \pm 0,32a	16,14 \pm 0,44a	-----
15,0 mg L ⁻¹	56,08 \pm 2,91a	78,92 \pm 3,80a	14,53 \pm 1,58b	3,66 \pm 0,67

SD – Desvio padrão amostral; médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente a um nível de significância de 5% pelo teste de Tukey 5% de probabilidade.

Fonte: Autor.

A ozonização não provocou variação significativa ($p>0,05$) da luminosidade no gergelim. Com relação a saturação de cor, obteve-se variação significativa nas concentrações de 10 mg L⁻¹ e 15 mg L⁻¹, em relação as respectivas testemunhas. O ozônio ocasionou redução da saturação de cor. No que se refere a tonalidade de cor, houve diferença significativa ($p<0,05$) quando se compararam os valores médios obtidos nas concentrações de 5 mg L⁻¹ e 10 mg L⁻¹, com as respectivas testemunhas. Nessas

condições, o ozônio ocasionou aumento na tonalidade de cor. Quanto a diferença de cor, verificou-se que a elevação da concentração do ozônio ocasiona aumento nos valores médios dessa variável. Apesar variação na cor dos grãos, possivelmente tais alterações não são perceptíveis aos consumidores.

Para futuros trabalhos, sugere-se avaliar o efeito do ozônio na qualidade do óleo de gergelim, visando verificar possíveis alterações no rendimento, na acidez e no índice de peróxido do óleo. A determinação de propriedades sensoriais dos grãos de gergelim ozonizados também deve ser considerada em trabalhos futuros.

4 CONCLUSÕES

O processo saturação do ozônio em gergelim segue o mesmo padrão de outros produtos agrícolas, sendo influenciada pela concentração de entrada. A meia-vida do ozônio em gergelim é de 2,6 minutos.

O ozônio se mostrou efetivo no controle de fungos em gergelim atingindo uma eficiência de 76% em fungos totais com a concentração de 15,0 mg L⁻¹. Para os fungos potencialmente aflatoxigênicos, todas as concentrações foram efetivas, atingindo uma eficiência de controle de 93% na concentração de 15,0 mg L⁻¹.

A ozonização dos grãos de gergelim nas condições adotadas, não altera significativamente o teor de água e a condutividade elétrica dos grãos. O ozônio altera a cor do produto. Entretanto, essas alterações não comprometem a comercialização do produto.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, E. R.; FARONI, L. R. D; MARTINS, M. A.; *et. al.* Study of saturation time and decomposition kinetics of ozone during the fumigation process of peanuts. **International Commission of Agricultural Engineering (CIGR)**. 2008.
- ALENCAR, E.R.; FARONI, L. R. D.; MARTINS, M. A.; *et. al.* Decomposition kinetics of gaseous ozone in peanuts. **Engenharia Agrícola** v. 31, n. 5, p. 930–939, out. 2011.
- ALENCAR, E. R. *et. al.* Effect of the ozonization process on the quality of peanuts and crude oil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v. 15, n. 2, p. 154–160, fev. 2011.
- ALENCAR, E. R. *et. al.* Efficacy of ozone as a fungicidal and detoxifying agent of aflatoxins in peanuts. **Journal of the Science of Food and Agriculture** v. 92, n. 4, p. 899–905, 15 mar. 2012.
- ALENCAR, E. R. *et. al.* Ozonation of quinoa seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.): Saturation and decomposition kinetics of ozone and physiological quality of seeds. **Semina: Ciências Agrárias** v. 42, n. 3, p. 1019–1032, 2021.
- ALMEIDA, F.A.C. *et. al.* Estudo de técnicas para o armazenamento de cinco oleaginosas em condições ambientais e criogênicas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais** v. 12, n. 2, p. 189–202, 30 dez. 2010.
- ALMEIDA, F. de A. C.; FONSECA, K. S.; GOUVEIA, J. P. G. Influência da embalagem e do local de armazenamento na qualidade fisiológica de sementes de gergelim. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v. 3, n. 2, p. 195–201, ago. 1999.
- ASAE – American Society of Agricultural Engineers. (2000). **Moisture measurements – Unground grain end seeds. Standards**, 563-563.
- AOCS. 2009. **Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists’ Society**. Champaign.
- ARRIEL, N. H. C. *et. al.* A cultura do gergelim. 1. ed. Brasília: **Embrapa Informação Tecnológica: Embrapa Algodão**, 2007.
- BARBARA, G.; BALLARIS, A. de L. A qualidade fisiológica de sementes de cereais submetidas a diferentes concentrações de ozônio. **UNIFUNEC Científica Multidisciplinar**. v. 10, n. 12, p. 1–14, 20 out. 2021.
- COSTA. M. de L. M.; GONDIM. T. M. de S.; ARAÚJO. I. M. da S. Características Físico-químicas de Sementes de Genótipos de Gergelim. **Revista Brasileira de Biociências**. v. 7, n. 1, p. 867–869, jul. 2007.
- DE OLIVEIRA, J. M. *et. al.* Ozonation of Brazil nuts: Decomposition kinetics, control of *Aspergillus flavus* and the effect on color and on raw oil quality. **LWT** v. 123, p. 109106, abr. 2020.

DOS SANTOS, J. E. *et al.* Ozonization process: saturation time, decomposition kinetics and quality of maize grains (*Zea mays L.*). In IOA Conference and Exhibition, 1., 2007, Valencia. **Anais...** Valencia: 2007. p 5.5. 1-6.

EN 1991-4: **Eurocode 1: Actions on structures - Part 4: Silos and tanks.** Belgium: European Committee for Standardization, 2006.

FAIAD, M. G. R.; WETZEL, M. M. V. S.; DE MIRANDA, A.; Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 26: Ocorrência e Sobrevivência de Fungos em Germoplasma-Semente de Gergelim (*sesamum indicum l.*). **Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia.** Brasília. Dez. 2002.

GOMES, C. E. *et al.* **Acompanhamento da Safra Brasileira 2021/2022 - 12º Levantamento.** CONAB, jul. 2022.

GOMES, H. H. S.; LIMA-PRIMO, H. E. De; SMIDERLE, O. J. Incidência de fungos em sementes de gergelim produzidas em cerrado de Roraima. **XXX Congresso Brasileiro de Agronomia.** Fortaleza, jul. 2017.

IAL. **Métodos físico-químicos para análises de alimentos.** 4. ed. [S.l.]: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

LIMA, L. P. *et al.* Saturação e cinética de decomposição do ozônio em meio poroso contendo feijão. In: **XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola.** 2014, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande, 2014.

KELLS, S.A.; MASON, L.J.; MAIER, D.E.; WOLOSOSHUK, C. P. Efficacy and fumigation characteristics of ozone in stored maize. **Journal of Stored Products Research**, v.37, n.4, p.371-383, 2001

KHADRE, M.A.; YOUSEF, A.E.; KIM, J.G. Microbiological Aspects of Ozone Applications in Food: A Review. **Journal of Food Science**, v.66, n.9, p.1242-1252, 2001.

MAINTINGUER, S. I. *et al.* Cenários das políticas públicas adotadas do programa nacional de produção do biodiesel no Brasil. Resumo. **Revista Tecnologia e Sociedade** v. 18, n. 51, p. 189–206, abr. 2022.

MENDEZ, F.; MAIER, D.E.; MASON, L.J.; WOLOSHUK, C.P. Penetration of ozone into columns of stored grains and effects on chemical composition and performance. **Journal of Stored Products Research**, v.39, n.1, p.33-44, 2003.

PITT, J.I.; HOCKING, A.D. Fungi and food spoilage. **New York: Springer.** p.519, 2009.

RAKNESS, K. *et al.* Guideline for Measurement of Ozone Concentration in the Process Gas from an Ozone Generator. **Ozone: Science & Engineering**, v. 18, n. 3, p. 209–229, Jan. 1996.

RIBEIRO, D. F. *et. al.* Ozone as a Fungicidal and Detoxifying Agent to Maize Contaminated with Fumonisin. **Ozone: Science & Engineering** v. 44, n. 1, p. 38–49, 2 Jan. 2022.

RODRIGUES, V. O. *et. al.* Ozônio no tratamento sanitário e efeito na qualidade fisiológica e bioquímica de sementes de pimentão. **Brazilian Journal of Development** v. 7, n. 2, p. 14856–14871, 2021.

SANCHEZ, Beatriz Alejandra Ortega *et. al.* Tracing interactions among column height, exposure time and gas concentration to dimension peanut antifungal ozonation. **LWT - Food Science and Technology** v. 65, p. 668–675, Jan. 2016.

SANTOS, R. R. *et. al.* Ozone as fungicide in rice grains. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v. 20, n. 3, p. 230–235, 1 mar. 2016.

SHARABY, N.; BUTOVCHENKO, A. Cultivation technology of sesame seeds and its production in the world and in Egypt. **Institute of Physics Publishing**, 19 Dez. 2019.

SYSTAT SOFTWARE Inc – SSI. **Signaplot for Windows, version 10.0**. 2006. Disponível em: <https://systatsoftware.com/signaplot/>. Acesso em 19 mai. 2023.

SILVA LIMA, B. F. *et. al.* Qualidade fisiológica de sementes de gergelim em função do equilíbrio higroscópico em diferentes saís. **Agropecuária Científica no Semiárido** v. 17, n. 1, p. 18, 19 jul. 2021.

SILVA, M. V. A. *et. al.* CFD modelling of diffusive-reactive transport of ozone gas in rice grains. **Biosystems Engineering** v. 179, p. 49–58, mar. 2019.

SILVA, M. V. A. Ozonização de grãos de milho de pipoca: cinética de reação, controle de insetos, desinfecção fúngica e características de qualidade. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2022.

SILVA, M.V.A. *et. al.* Kinetics of the ozone gas reaction in popcorn kernels. **Journal of Stored Products Research** v. 83, p. 168–175, set. 2019.

SILVA, T. P. P. *et. al.* Influência do extrato de *Crassiphycus birdiae* na qualidade sanitária e fisiológica em sementes de gergelim. **Brazilian Journal of Development** v. 7, n. 3, p. 28250–28269, 2021.

VENEGAS, J. G.; HARRIS, R. S.; SIMON, B. A. A comprehensive equation for the pulmonary pressure-volume curve. **Journal of Applied Physiology**, v. 84, n. 1, p. 389–395, 1998.

VIEIRA, R.D. Teste de condutividade elétrica. In: VIEIRA, R.D.; CARVALHO, N.M. (Ed.). **Testes de vigor em sementes**. Jaboticabal: FUNEP, 1994. p.103-132.

WRIGHT, Margaret Robson. **An introduction to chemical kinetics**. [S.l.]: Wiley, 2004.