

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**INTERAÇÕES ENTRE ALTURA DE COLUNA, CONCENTRAÇÃO E TEMPO DE
EXPOSIÇÃO NA OZONIZAÇÃO DE CASTANHA-DO-BRASIL (*Bertholletia
excelsa* H.B.K): SATURAÇÃO, ALTERAÇÕES NA QUALIDADE E ANÁLISE
ECONÔMICA**

JULIANA MARTINS DE OLIVEIRA

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA/DF

JUNHO/2023



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

INTERAÇÕES ENTRE ALTURA DE COLUNA, CONCENTRAÇÃO E TEMPO DE EXPOSIÇÃO NA OZONIZAÇÃO DE CASTANHA-DO-BRASIL (*Bertholletia excelsa* H.B.K): SATURAÇÃO, ALTERAÇÕES NA QUALIDADE E ANÁLISE ECONÔMICA

JULIANA MARTINS DE OLIVEIRA

TESE DE DOUTORADO EM AGRONOMIA

BRASÍLIA/DF

JUNHO/2023



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA

**INTERAÇÕES ENTRE ALTURA DE COLUNA, CONCENTRAÇÃO E TEMPO
DE EXPOSIÇÃO NA OZONIZAÇÃO DE CASTANHA-DO-BRASIL
(*Bertholletia excelsa* H.B.K): SATURAÇÃO, ALTERAÇÕES NA
QUALIDADE E ANÁLISE ECONÔMICA**

JULIANA MARTINS DE OLIVEIRA

**TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM AGRONOMIA.**

APROVADO POR:

**ERNANDES RODRIGUES DE ALENCAR, Dr. Professor Adjunto UnB – FAV
(Orientador)**

ALESSANDRA APARECIDA ZINATO RODRIGUES TEIXEIRA, Dra. UFV

MÁRCIO ANTONIO MENDONÇA, Dr. UnB

SILVIA DE CARVALHO CAMPOS BOTELHO, Dra. EMBRAPA

BRASÍLIA/DF, 30 DE JUNHO DE 2023

FICHA CARTOGRÁFICA

Oliveira, Juliana Martins
Interações entre altura de coluna, concentração e tempo de exposição na ozonização de castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K): saturação, alterações na qualidade e análise econômica/ Juliana Martins de Oliveira; orientação de Ernandes Rodrigues de Alencar. – Brasília, 2023.

78 p.:il.

Tese de doutorado (D) - Universidade de Brasília/Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2023.

1. Ozonização. 2. Castanha-do-Brasil. 3. Análise econômica

Ernandes, R. A. Ph.D

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, J. M. **Interações entre altura de coluna, concentração e tempo de exposição na ozonização de castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K): saturação, alterações na qualidade e análise econômica.** Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2023, 78p. Tese de Doutorado.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Juliana Martins de Oliveira

TÍTULO: Interações entre altura de coluna, concentração e tempo de exposição na ozonização de castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K): saturação, alterações na qualidade e análise econômica

GRAU: Doutor

ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais de publicação. Nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

Nome: Juliana Martins de Oliveira
E-mail: moliveira.juliana@gmail.com

DEDICATÓRIA

*À minha mãe, Nauza Martins, que é a
pessoa mais forte, batalhadora,
corajosa e inteligente que conheço, e
me inspira todos os dias.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Nauza, meus irmãos Carol e Vinícius e toda minha família que me apoiou em todas as etapas dessa caminhada e estiveram ao meu lado partilhando conquistas e realizações.

Ao professor Dr. Ernandes Rodrigues de Alencar, pelas oportunidades, incentivo, dedicação, paciência e conhecimento compartilhado.

Ao professor Dr. Gabriel Medina, pela ajuda e apoio oferecidos.

Ao professor Dr. Márcio Mendonça, pela presteza e suporte sempre.

À Emayre, por estar ao meu lado todos os dias me apoiando, incentivando e ajudando de todas as formas possíveis.

Às minhas estagiárias maravilhosas Sinara e Manu, não só pelo auxílio, mas pela companhia e pelas risadas.

Aos meus bebês Lexa e Olly pelo amor incondicional que sempre me alegra nos momentos difíceis.

À Universidade de Brasília (UnB), Programa de pós-graduação em agronomia pelo apoio institucional e por todos os seus professores que compartilharam conhecimentos e conselhos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos, ao CNPq e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) pelo apoio financeiro.

Muito obrigada!

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE GERAL	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE TABELAS	viii
RESUMO GERAL	ix
ABSTRACT	xi
INTRODUÇÃO GERAL	1
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
CAPÍTULO I	23
RESUMO.....	24
ABSTRACT	25
INTRODUÇÃO	26
MATERIAL E MÉTODOS	28
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
CONCLUSÕES	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
CAPÍTULO II	46
RESUMO.....	47
ABSTRACT	48
INTRODUÇÃO	49
MATERIAL E MÉTODOS	51
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Valor da produção de castanha-do-Brasil no Brasil.....	6
Figura 2 – Histórico do valor de produção (mil reais) de castanha-do-Brasil entre os anos de 2017 e 2021.....	6

CAPÍTULO I

Figura 1 – Esquema experimental para ozonização da castanha-do-Brasil.....	29
Figura 2 – Concentração residual do ozônio em castanha-do-Brasil em diferentes combinações de altura da coluna (0,25 m – A; 0,50 m – B; 0,75 m – C) e concentrações de entrada do gás (2,5; 4,5; 9,0 e 14,5 mg/L) em função do tempo.....	35
Figura 3 – Curvas de regressão para índice de peróxido do óleo bruto (meq/kg, A), luminosidade (L^* , B) e saturação de cor ou croma (C^* , C) em castanha-do-Brasil em função do período de ozonização, independentemente da concentração de entrada do gás e da altura da coluna do produto.....	38
Figura 4 – Curvas de regressão para tonalidade de cor (h^*) em castanha-do-Brasil em função do período de ozonização, nas concentrações de entrada do gás, independentemente da altura da coluna do produto.....	39

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de composição nutricional de castanha-do-Brasil para uma porção de 100 gramas.....	4
Tabela 2 –Toxidez das micotoxinas.....	10
Tabela 3 – Limites Máximos Tolerados (LMT) para micotoxinas.....	11

CAPÍTULO I

Tabela 1 – Equações de regressão ajustadas e respectivos coeficientes de determinação (R^2) para concentração residual do ozônio (mg L^{-1}) em diferentes combinações de altura da coluna e concentrações de entrada do gás em função do tempo.....	36
Tabela 2 – Equações de regressão para índice de peróxido do óleo bruto (meq/kg, A), luminosidade (L^* , B) e saturação de cor ou croma (C^* , C) em castanha-do-Brasil em função do período de ozonização, independentemente da concentração de entrada do gás e da altura da coluna do produto, e respectivos coeficientes de determinação (R^2).....	38
Tabela 3 – Equações de regressão para tonalidade de cor (h^*) em castanha-do-Brasil em função do período de ozonização, nas concentrações de entrada do gás, independentemente da altura da coluna do produto, e respectivos coeficientes de determinação (R^2).....	40

CAPÍTULO II

Tabela 1 – Preço, vida útil e depreciação anual de cada equipamento.....	53
Tabela 2 – Despesas correntes, custo e valor anual.....	53
Tabela 3 – Valores de tempo de retorno de capital, valor presente líquido e taxa interna de retorno de cada configuração com taxas de perda estipuladas em 1%, 2% e 5%.....	56

RESUMO GERAL

A castanha-do-Brasil é vista como um dos principais produtos extrativistas da Amazônia, com grande potencial econômico e social. Uma das grandes preocupações da segurança alimentar na cadeia de produção da castanha-do-Brasil é a contaminação por fungos toxigênicos, especialmente do gênero *Aspergillus*. É de extrema importância o controle adequado durante todas as etapas da produção, com o intuito de evitar a contaminação das castanhas por aflatoxinas e atender os padrões para consumo e comercialização, inclusive para exportação. O ozônio vem sendo utilizado como uma alternativa para o controle de aflatoxinas em alimentos. Esse gás se destaca pelo seu elevado potencial oxidativo e por sua rápida decomposição em composto não tóxico, o oxigênio. Esse processo de decomposição é acelerado quando em contato com material orgânico. Dessa forma, objetivou-se avaliar o processo de saturação em coluna contendo castanha-do-Brasil, possíveis alterações na qualidade do produto e a análise de configurações para estudar a viabilidade econômica da implementação de um sistema de ozonização para beneficiamento da castanha-do-Brasil em indústrias. O estudo foi realizado em duas etapas. Na primeira etapa analisou-se o processo de saturação em coluna contendo castanha-do-Brasil e possíveis alterações na qualidade do produto. As amostras de castanha-do-Brasil foram acondicionadas em coluna cilíndrica de PVC de 15 cm de diâmetro e 110 cm de altura. Foram adotadas as concentrações do gás ozônio de 2,5; 4,5; 9,0 e 14,0 mg L⁻¹ e vazão de 3,0 L min⁻¹, na temperatura de 25 °C. O gás ozônio foi injetado na base da coluna cilíndrica e os valores adotados de altura da coluna de grãos foram de 0; 0,25; 0,50 e 0,75 m. Determinaram-se o tempo de concentração e a concentração de saturação. Na avaliação de possíveis alterações na qualidade de castanhas-do-Brasil ozonizadas foram determinadas a umidade, a coloração e as variáveis qualitativas do óleo bruto, com tempos de exposição de 0, 3, 6, 9 e 12 h. Para avaliação da qualidade do óleo bruto extraído de castanhas ozonizadas foram analisados o teor de ácidos graxos livres, o índice de peróxido e o índice de iodo. Foi possível concluir que a altura da coluna do produto influencia o tempo e a concentração de saturação durante o processo de ozonização. O uso do ozônio nas condições adotadas no presente estudo não afeta a qualidade da castanha-do-Brasil. Na segunda etapa do estudo analisou-se a viabilidade econômica de sistemas de ozonização

utilizando combinações com dois tipos de silo (inox e polipropileno) e dois geradores de oxigênio (central de gases e PSA), simulando 4 configurações que foram comparadas entre si por meio de uma análise econômica baseada no modelo de fluxo de caixa. Os índices valor presente líquido (VPL), tempo de retorno de capital (TRC) e taxa interna de retorno (TIR) foram aplicados durante as análises. Para a simulação foi considerado um período de ozonização de 24 h com uma vazão de oxigênio de 3 L min⁻¹ e a concentração do ozônio de 8,88 mg L⁻¹. Além disso, foi considerado que poderão ser tratadas 500 t por ano (100 lotes de 5 t). Foram utilizadas 3 estimativas de perda do lote total no caso da não implantação da tecnologia nos valores de 1%, 2% e 5%. Os indicadores financeiros (TRC, VPL e TIR) encontrados nesse trabalho permitiram concluir que dos 12 cenários avaliados de configurações de instalação de um sistema de ozonização na indústria, 10 são rentáveis e viáveis. A configuração que apresentou maior viabilidade e rentabilidade foi a composta por silo de polipropileno e gerador PSA (configuração 4). Por outro lado, a configuração menos rentável, mas ainda sim viável foi a composta por silo de inox e gerador com central de gases (configuração 1). A instalação de um sistema de ozonização para sanitização e desinfecção de castanha-do-Brasil na indústria é viável e rentável.

Palavras-chave: *Ozonização; Tempo de saturação; Concentração de saturação; Alterações qualitativas; Análise econômica.*

ABSTRACT

The Brazil nut is seen as one of the main extractive products of the Amazon, with great economic and social potential. One of the major food safety concerns in the Brazil nut production chain is contamination by toxigenic fungi, especially of the *Aspergillus* genus. Proper control during all stages of production is extremely important, in order to avoid contamination of nuts by aflatoxins and to meet standards for consumption and trade, including for export. Ozone has been used as an alternative to control aflatoxins in food. This gas stands out for its high oxidative potential and for its rapid transformation into a non-toxic compound, oxygen. This decomposition process is accelerated when in contact with organic material. Thus, the objective of this study was to evaluate the saturation process in a column containing Brazil nuts, possible changes in the quality of the product and the scenario analysis to study the economic viability of implementing an ozonation system for processing Brazil nuts. The study was carried out in two stages. In the first stage, the saturation process in a column containing Brazil nuts and possible changes in the quality of the product were analyzed. The Brazil nut samples were placed in a cylindrical PVC column measuring 15 cm in diameter and 110 cm in height. Ozone gas concentrations of 2,5; 4,5; 9.0 and 14.0 mg L⁻¹ and a flow rate of 3.0 L min⁻¹ were adopted at a temperature of 25 °C. Ozone gas was injected at the base of the cylindrical column and the values adopted for the height of the grain column were 0; 0,25; 0,50, and 0,75 m. Concentration time and saturation concentration were determined. In the evaluation of possible changes in the quality of ozonated Brazil nuts, moisture, color and qualitative variables of the crude oil were determined, with exposure times of 0, 3, 6, 9 and 12 h. To evaluate the quality of the crude oil extracted from ozonized nuts, the content of free fatty solids, the peroxide value and the iodine value were observed. It was possible to conclude that the height of the product column influences the time and the saturation concentration during the ozonation process. The use of ozone under the conditions adopted in the present study does not affect the quality of Brazil nuts. In the second stage of the study, the economic viability of ozonation systems was analyzed using combinations with two types of silo (stainless-steel and polypropylene) and two oxygen generators (central gas and PSA), simulating 4 configurations that were compared to each other through of an economic analysis based on the cash flow model. Net present

value (NPV), Payback period (PP) and internal rate of return (IRR) indices were applied during the analyses. For the simulation, an ozonation period of 24 h was considered with an oxygen flow rate of 3 L min⁻¹ and an ozone concentration of 8,88 mg L⁻¹. Furthermore, it was considered that 500 t could be treated per year (100 batches of 5 t). 3 estimates of loss of the total batch were used in the case of non-implementation of the technology in the values of 1%, 2% and 5%. The financial indicators (PP, NPV and IRR) found in this work allowed the conclusion that of the 12 scenarios evaluated for installation configurations of an ozonation system in the industry, 10 are profitable and viable. The configuration that showed the greatest viability and profitability was the one composed of a polypropylene silo and PSA generator (configuration 4). On the other hand, the least profitable configuration, but still viable, was composed of a stainless-steel silo and a generator with central gas (configuration 1). The installation of an ozonation system for the sanitization and disinfection of Brazil nuts in the industry is feasible and profitable.

Keywords: *Ozonation; Saturation time; Saturation concentration; qualitative qualities; Economic analysis.*

INTRODUÇÃO GERAL

Obtida de uma árvore sul-americana, de família *Lecythidaceae*, a castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) é uma semente oleaginosa comestível encontrada na Bacia do rio Amazonas, incluindo Brasil, Peru, Equador, Colômbia e Venezuela. É rica em óleo, proteína, fibra, selênio (Se), magnésio (Mg), potássio (K), fósforo (P), zinco (Zn), cálcio (Ca), cobre (Cu), ferro (Fe) e vitamina B6 (FERRARI, 2020).

A castanha-do-Brasil é vista como um dos principais produtos extrativistas da Amazônia, comprovando o grande potencial econômico e social da castanha e da própria região. Suas amêndoas apresentam alto valor nutritivo e econômico, sendo uma das principais fontes de renda dos povos tradicionais (MENEGUETTI et al., 2015).

Uma das grandes preocupações da segurança alimentar na cadeia de produção da castanha-do-Brasil é a contaminação por fungos toxigênicos, especialmente do gênero *Aspergillus* (GALO et al. 2016). Esses fungos apresentam elevada toxidez, aguda e crônica, sendo o fígado o órgão mais afetado. Diante desse cenário, é fundamental o controle adequado durante todas as etapas da produção, com o intuito de evitar a contaminação das castanhas por aflatoxinas e atender os padrões para consumo e comercialização, inclusive para exportação, já que o Brasil vem perdendo o mercado internacional para países como Bolívia (FAO, 2021).

O ozônio vem sendo utilizado como uma alternativa para o controle de aflatoxinas em alimentos (ALENCAR et al., 2012; CHEN et al., 2014), devido sua capacidade de inativar microrganismos e de degradar esse tipo de micotoxina. A capacidade do ozônio de inativar microrganismos é justificada pelo seu elevado potencial oxidativo (KIM et al, 1999).

Considerando-se que o ozônio é altamente reativo quando em contato com material orgânico, é necessário que seja feita a avaliação cinética de decomposição do gás em meio contendo produtos distintos de origem vegetal, determinando assim parâmetros como tempo de saturação, concentração de saturação e possíveis alterações qualitativas do produto. Além disso, tendo em vista a importância econômica da castanha-do-Brasil e a queda na exportação que o país vem apresentando nas últimas décadas, objetivou-se avaliar o processo de saturação em

coluna contendo castanha-do-Brasil, possíveis alterações na qualidade do produto e a análise de configurações para estudar a viabilidade econômica da implementação de um sistema de ozonização para beneficiamento da castanha-do-Brasil em escala industrial.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Castanha-do-Brasil

Os produtos florestais são essenciais para a subsistência rural e são fundamentais para as tentativas de conciliar desenvolvimento econômico e conservação de florestas em países como o Brasil (BRONDIZIO et al., 2021). A castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*, H.B.K.) é um dos produtos florestais não-madeireiros com maior importância econômica, além de ser comercializada internacionalmente e ser uma das espécies mais icônicas da Amazônia, é considerada um pilar para a conservação baseada em meios de subsistência, particularmente em áreas extrativistas, reservas e outras áreas protegidas (GUARIGUATA et al., 2017).

A castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*, H.B.K.) é uma espécie nativa da Amazônia e faz parte da Família Lecythidaceae. A floresta amazônica possui vários ecossistemas com grande biodiversidade. O clima equatorial é quente e úmido, com temperatura média de 26° C e umidade relativa de 80 a 95%. No Brasil, as castanhas são um dos produtos mais importantes extraídos desta região, suas sementes são ricas em proteínas, lipídios e vitaminas e são fonte de selênio (TANIWAKI et al., 2019).

As árvores de *Bertholletia excelsa* crescem silvestres, atingindo até 60 metros, levando 12 anos para dar frutos e podendo viver até 500 anos. As castanhas comestíveis são as sementes de uma fruta que leva por volta de quatorze meses para amadurecer, são cápsulas esféricas de mesocarpo lenhoso e são extremamente duras, pesam até dois quilos e contém oito a vinte e quatro sementes triangulares com até dois centímetros de largura e cinco centímetros de comprimento (CARDOSO et al., 2017; TANIWAKI et al., 2019).

A castanha-do-Brasil é colhida por catadores florestais que geralmente são pessoas locais, a comercialização desta castanha é uma das principais fontes de renda de muitos povos amazônicos, comunidades indígenas e ribeirinhas (CARDOSO et al., 2017).

Valor Nutricional

O produto mais importante da *Bertholletia excelsa* é sua castanha que pode ser consumida tanto “in natura” ou misturada com outros alimentos. As nozes em geral

possuem alto teor de gordura e proteína, o que contribui para uma alta densidade energética e seu perfil de macronutrientes leva a altos níveis de saciedade (SHANG et al., 2017).

As castanhas-do-Brasil são boas fontes de lipídios e são consideradas benéficas para a saúde devido ao alto teor de ácidos graxos monoinsaturados, poliinsaturados (YANG, 2009). Um dos destaques nutricionais da castanha é seu elevado percentual de selênio, que é um importante antioxidante e vem sendo vinculado a redução de alguns tipos de câncer e outras doenças (CARDOSO et al., 2017).

Além disso, a castanha contém uma ampla gama de oligoelementos em quantidades significativas e seus efeitos estão relacionados a grandes benefícios à saúde, podendo contribuir para a prevenção de deficiências nutricionais. A castanha-do-Brasil tem maiores concentrações de magnésio, cobre e zinco quando comparada com outras nozes, embora tenham baixa concentração de ferro. Estudos associaram a ingestão de castanhas com melhor adequação de nutrientes e maior qualidade da dieta. Os consumidores de castanha têm uma ingestão mais favorável de vitaminas A e C, folato, cálcio, ferro, magnésio e zinco (O'NEIL et al., 2015). A composição nutricional apresenta-se na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de composição nutricional de castanha-do-Brasil para uma porção de 100 gramas.

COMPOSTO	QUANTIDADE	FUNÇÃO
Gorduras totais	61g	Principais fontes de energia do corpo e ajudam na absorção das vitaminas A, D, E e K.
Gorduras saturadas	15g	Contribui para o aumento do colesterol HDL, que passa pelos vasos realizando uma limpeza na área. Além disso, participa da produção de hormônios e do transporte de vitaminas lipossolúveis, como A, D, E e K.
Gorduras poliinsaturadas	21g	Pode ajudar no controle dos níveis LDL e HDL, prevenir doenças cardiovasculares e neuromotoras e são fonte de energia para o corpo.
Gorduras monoinsaturadas	25g	Ajudam a reduzir os níveis de colesterol ruim no sangue (LDL), diminuindo o risco de doenças cardiovasculares. Também ajudam na formação de células do corpo.
Calorias	659 kcal	Fonte de Energia.
Carboidratos	12g	Fonte de Energia.
Fibra alimentar	8g	Ajuda na digestão e formação do bolo fecal. Reduz o risco de certos tipos de câncer.
Proteínas	14 g	Essencial ao crescimento.
Cálcio	160mg	Ajuda na formação óssea e dental.

Ferro	2,43mg	Fundamental no transporte e na distribuição de oxigênio nas células do corpo, ajudando a combater a anemia ferropriva.
Magnésio	376mg	Fundamental para a formação dos ossos e dentes e para o funcionamento normal dos nervos e dos músculos.
Fósforo	725mg	Fundamental no crescimento, na manutenção e reparação de ossos e dentes.
Potássio	659mg	Auxilia na transmissão dos impulsos nervosos.
Sódio	3mg	Garante o balanço hídrico do corpo.
Zinco	4,06mg	Participação da síntese e degradação dos carboidratos, lipídios e proteínas, na defesa contra agentes antioxidantes e na manutenção do crescimento do corpo.
Cobre	1,74mg	Importante para a produção de glóbulos vermelhos, produção de colágeno na pele e para a saúde óssea, além de ser ativador do sistema imunológico.
Manganês	1,22mg	Ajuda a regular o metabolismo.
Selênio	1920 µg	Fortalece o sistema imunológico e ajuda na prevenção de várias doenças, desde disfunções na tireoide até o Alzheimer e câncer.
Vitamina B1	0,3mg	Assegura o funcionamento normal do sistema nervoso, do apetite e da digestão.
Vitamina E (tocoferóis)	5,65mg	Protege as células e os tecidos do corpo contra o envelhecimento.

Fonte: USDA (United States Department of Agriculture), 2022.

Produção de castanha-do-Brasil

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de castanha-do-Brasil, apenas atrás da Bolívia, sendo que a região norte é responsável por 93% da produção nacional. Segundo o IBGE (2022), a produção brasileira de castanha no ano de 2021 foi de 33.406 toneladas, gerando um valor de produção de 142.367.000 reais, o Acre foi o maior produtor com um valor de produção de 57.247.000 reais, seguido pelo Amazonas (38.549.000 reais), Pará (17.375.000 reais), Mato Grosso (12.805.000 reais), Roraima (9.042.000 reais), Rondônia (6.378.000 reais) e Amapá (971.000 reais) (Figura 1).

Mapa (BR) - Castanha-do-pará - Valor da produção (Mil Reais)

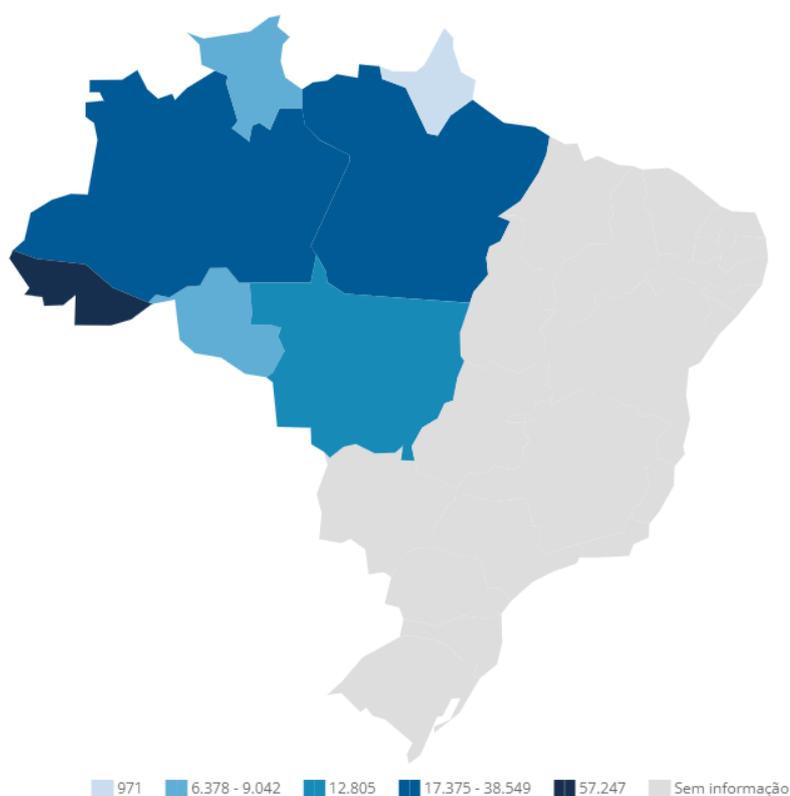


Figura 1. Valor da produção de castanha-do-Brasil no Brasil.

Fonte: IBGE, 2022.

De acordo com a série histórica de produção de castanha-do-Brasil, o ano de 2021 apresentou o maior valor de produção dos últimos 5 anos, o que mostra o crescimento e a importância da produção de castanha na economia do país. (Figura 2).

Série histórica (BR) - Castanha-do-pará - Valor da produção

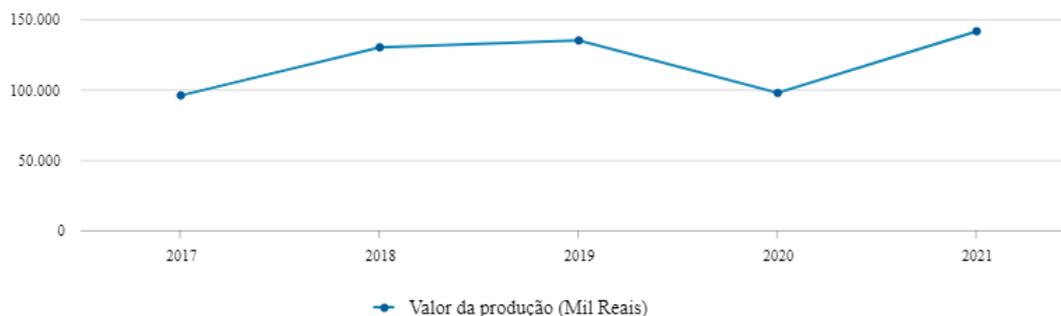


Figura 2. Histórico do valor de produção (mil reais) de castanha-do-Brasil entre os anos de 2017 e 2021. Fonte: IBGE, 2022.

Fatores que influenciam o crescimento de fungos na castanha-do-Brasil

A castanha-do-Brasil é obtida principalmente por meio de práticas extrativistas. A adoção desse sistema tão tradicional muitas vezes resulta em problemas de contaminação, o que compromete a qualidade geral do produto e leva a depreciação comercial. As características da cadeia produtiva e as más condições de manejo e manuseio da castanha facilitam a sua contaminação podendo gerar riscos à saúde do consumidor (ROCHA et al., 2021).

A castanha-do-Brasil é extraída do interior de ouriços (fruto lenhoso capsular), que pode conter de 15 a 25 castanhas por fruta (BITENCOURT et al., 2020). Durante o período de coleta deste produto o clima é caracterizado por alta umidade relativa devido à chuva, essa condição influencia positivamente o desenvolvimento de microrganismos produtores de aflatoxina (BOTELHO et al., 2019). A secagem é uma das etapas mais importantes do processamento da castanha devido ao alto teor de umidade e atividade de água do produto, por isso é necessário agir de forma eficiente para evitar o crescimento de fungos (TAKEUCHI; EGEEA, 2019).

Vários fatores intrínsecos e extrínsecos como composição nutricional, fatores ambientais (temperatura, atividade da água e umidade relativa), tempo e armazenagem, microclima, uso de fungicidas, mudanças climáticas, assim como o status agrônomo e socioeconômico são relatados como fatores que promovem a biossíntese de aflatoxinas e precisam ser controlados para a segurança do alimento (KUMAR et al., 2022).

Micotoxinas

As micotoxinas são um grupo de metabólitos fúngicos tóxicos encontrados em uma vasta gama de produtos alimentares e de rações. Algumas micotoxinas como aflatoxinas, ocratoxina A, fumonisinas, desoxinivalenol, zearalenona e patulina têm recebido atenção do público devido à gravidade de seus efeitos na saúde (AFSAH-HEJRI et al., 2020).

A contaminação dos alimentos por micotoxinas é dada em diversas circunstâncias ao longo da produção. Pode ocorrer na cadeia alimentar de culturas doentes, que podem ser consumidas diretamente por seres humanos ou utilizadas como ração animal. A contaminação de cereais e produtos à base de cereais implicam em mais preocupações significativas devido aos seus efeitos adversos para a saúde em humanos. *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, *Alternaria* e *Claviceps* spp. são os principais fungos produtores de micotoxinas (KHANEGHAH et al., 2019).

Contaminação por micotoxinas é um problema global, mas é mais grave em regiões quentes e ambientes úmidos que favorecem o crescimento de fungos e produção de micotoxinas. A contaminação por micotoxinas impõe encargos econômicos tanto para a agricultura como para a indústria alimentar (AFSAH-HEJRI et al., 2020).

O consumo de alimentos contaminados com micotoxinas pode causar efeitos agudos ou crônicos à saúde. Portanto, a maioria dos países estabeleceram regulamentos rigorosos para nível de permissão de algumas micotoxinas em alimentos. O regulamento mais rigoroso para micotoxinas em alimentos foi estabelecido pela União Europeia. Os limites da UE fornecem os níveis máximos permitidos para várias combinações micotoxina-alimento (ESKOLA et al., 2018).

Não há técnica disponível para eliminar completamente micotoxinas de alimentos ou rações. No entanto, existem algumas técnicas para detoxificar alimentos e produtos agrícolas. A detoxificação pode ser alcançada através de processos físicos, biológicos ou químicos (AFSAH-HEJRI et al., 2020).

Classificação das micotoxinas

Do ponto de vista da segurança alimentar, as micotoxinas mais relevantes são aquelas produzidas por moldes de *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium*, e gêneros

Alternaria e *Claviceps*. Aproximadamente 400 micotoxinas já foram descritas, as micotoxinas mais importantes são as aflatoxinas (AFs) (representadas por aflatoxina B1 (AFB1), B2 (AFB2), G1 (AFG1), G2 (AFG2), M1 (AFM1)), ocratoxinas (OTs) (representadas pela ocratoxina A (OTA)), fumonisinas (FBs) (representadas por fumonisinas B1 (FB1), B2 (FB2) e B3 (FB3)), tricotecenos (TCs) (com o tipo A representado por HT-2 toxina (HT2) e toxina T-2 (T2), e tipo B representada principalmente por desoxinivalenol (DON)), zearalenona (ZEN), as micotoxinas emergentes de *Fusarium* (fusaproliferina (FP), moniliformina (MON), beauvericina (BEA), toxina NX-2 e enniatinas (ENNs)), alcalóides do ergot (EAs), toxinas *Alternaria* (ATs) (como altenueno (ALT), alternariol (AOH), alternariol metil éter (AME), altertoxina (ALTs) e ácido tenuazônico (TeA)) e patulina (PAT) (SINGH; MEHTA, 2020).

As micotoxinas não podem ser detectadas a olho nu, mas podem ser vistas sob luz ultravioleta (UV); além disso, não possuem odor característico e não alteram as características organolépticas dos alimentos (SINGH; MEHTA, 2020).

Toxicidade

As micotoxinas podem ter uma ampla variedade de efeitos tóxicos, atuando inclusive sobre o sistema imunológico. Em geral, o risco de intoxicação aguda em humanos é baixo ou moderado em comparação com o envenenamento por fontes microbiológicas ou por poluentes químicos. No que diz respeito à toxicidade crônica, a Agência Internacional para Pesquisa em Câncer (IARC) classificou várias micotoxinas como agentes cancerígenos ou potencialmente cancerígenos para humanos. No entanto, deve-se considerar possíveis interações quando diferentes micotoxinas são consumidas juntas, uma vez que efeitos sinérgicos, aditivos, antagonistas ou potenciadores podem aparecer na saúde humana (IARC, 2022).

A toxidez das principais micotoxinas encontradas em alimentos e seus impactos na saúde humana e animal estão apresentados na Tabela 2. As aflatoxinas são as que mais se destacam por sua elevada toxidez, principalmente a aflatoxina B1.

Tabela 2. Toxidez das micotoxinas

MICOTOXINA	IMPACTO NA SAÚDE HUMANA	IMPACTO NA SAÚDE ANIMAL
Aflatoxina	Envenenamento agudo e carcinogênese	Teratogênese do sistema reprodutor
Fumonisina	Baixo desenvolvimento e carcinogênese	Teratogênese neuroesquelética
Zearalenona	Hiperestrogenismo e carcinogênese	Teratogênese do sistema reprodutor
Deoxivalenol	Dano gastrointestinal e genotoxicidade crônica	Teratogênese esquelética
Ocratoxina	Nefropatia e carcinogênese	Teratogênese facial-esquelética

Fonte: (SILVA et al., 2021)

Aflatoxinas

As aflatoxinas (AFs) são um grupo de metabólitos secundários extremamente tóxicos e cancerígenos que podem contaminar os alimentos no campo, durante o armazenamento ou após o processamento (TANIWAKI et al. 2017). As aflatoxinas são furanocumarinas formadas por *Aspergillus flavus*, *Aspergillus nomius* e *Aspergillus parasiticus* ea contaminação ocorre principalmente por insuficiência de técnicas de cultivo ou armazenamento, sendo as principais aflatoxinas B1 (AFB1), B2 (AFB2), G1 (AFG1), G2 (AFG2) e M1 (AFM1) (JAVANMARDI et al. 2020).

As aflatoxinas são um grupo de micotoxinas produzidas por cepas de várias espécies de bolores do gênero *Aspergillus* e podem ser encontrados em muitos alimentos. Animais que consomem alimentos contaminados com aflatoxina B pode metabolizá-la por hidroxilação. Assim, AFM1 é formada a partir de AFB1, e a aflatoxina M2 (AFM2) é formada da AFB2, metabólitos que são excretados no leite de mamíferos. As AFs são atualmente consideradas as micotoxinas com o maior risco para a saúde humana, principalmente devido ao seu potencial carcinogênico hepatocelular. A mais tóxica é a AFB1, que mostrou ser cancerígena na maioria dos experimentos (IARC, 2022)

As AFLs são substâncias apolares, solúveis em solventes como o clorofórmio, metanol, benzeno, acetonitrila e dimetilsulfóxido. São instáveis a luz UV, mas estáveis a temperatura acima de 25°C e não são afetadas pelo frio, são incolores, inodoras e não alteram o sabor dos alimentos (JAGUER; TONIN, 2021).

Em 2003, a União Europeia restringiu a importação de castanha-do-Brasil devido a relatos de níveis elevados de aflatoxinas, causando um retorno de 10% dos lotes contaminados devido à contaminação excessiva por aflatoxinas. Essa restrição

foi de grande preocupação tanto economicamente quanto no que diz respeito à alimentação, segurança e saúde do consumidor no Brasil. A ocorrência de aflatoxinas na castanha do Brasil tornou-se uma restrição crítica para a comercialização (CALDERARI et al., 2013).

A castanha-do-Brasil é um produto extrativista, portanto, as práticas agrícolas comuns não se aplicam. Os produtos caem das árvores durante os meses de janeiro a abril, quando o ambiente é muito úmido devido à chuva constante. A água pode entrar facilmente através do opérculo que está em contato com o solo, permitindo o crescimento de fungos (CALDERARI et al., 2013).

Por sua importância comercial e sua facilidade de contaminação por aflatoxinas, é importante o estudo de métodos de inativação do fungo *Aspergillus flavus* e da detoxificação da castanha-do-Brasil. Um desses métodos é a ozonização.

Legislação

A Resolução N°7, de 18 de fevereiro de 2011, dispõe sobre limites máximos tolerados (LMT) para micotoxinas em alimentos e define que os níveis de micotoxinas deverão ser tão baixos quanto razoavelmente possível, devendo ser aplicadas as melhores práticas e tecnologias na produção, manipulação, armazenamento, processamento e embalagem, de forma a evitar que um alimento contaminado seja comercializado ou consumido (BRASIL, 2011). A Tabela 3 apresenta os limites específicos determinados para castanha-do-Brasil.

Tabela 3. Limites Máximos Tolerados (LMT) para micotoxinas

MICOTOXINAS	ALIMENTO	LMT ($\mu\text{g}/\text{kg}$)
Aflatoxinas B1, B2, G1, G2	Castanha-do-Brasil com casca para consumo direto	20
	Castanha-do-Brasil sem casca para consumo direto	10
	Castanha-do-Brasil sem casca para processamento posterior	15

Fonte: BRASIL, 2011

Métodos para controle de micotoxinas

A redução da contaminação por micotoxinas em produtos agrícolas é um problema muito importante em muitos países do mundo, o que levou ao

desenvolvimento de vários métodos de controle. Todas as estratégias de pré-colheita visam evitar o desenvolvimento de fungos toxigênicos e, conseqüentemente, de micotoxinas. No entanto, uma vez que as micotoxinas são produzidas, a desintoxicação dos alimentos deve ser baseada em práticas pós-colheita (ADEYEYE, 2020).

Métodos pré-colheita

Os métodos ou estratégias de prevenção pré-colheita incluem boas práticas agrícolas, boas práticas de fabricação, fatores ambientais apropriados e práticas de armazenamento favoráveis (LUO et al., 2018). Alguns exemplos de boas práticas agrícolas incluem a implementação de um programa de rotação de culturas, uso de inseticidas, fungicidas e herbicidas registrados para controle de danos causados por insetos, infecções fúngicas e erradicação de ervas daninhas, tratamento adequado do canteiro de sementes, análise do solo para determinar a necessidade de adicionar fertilizantes e aprimoramento da síntese genética para suprimir a produção de micotoxinas (ADEBIYI, 2019).

Dentre os fatores ambientais, a temperatura e a umidade são os fatores que exercem mais influência sobre os fungos micotoxigênicos para a produção de micotoxinas. No que diz respeito às práticas de armazenamento favoráveis, a temperatura, o nível de umidade e a umidade dos armazéns são fatores cruciais para o crescimento de fungos e produção de micotoxinas (LUO et al., 2018).

Métodos pós-colheita

As micotoxinas podem ser eliminadas por meios naturais, como isolamento térmico, tratamento com radiação e plasma de baixa temperatura, métodos químicos, como oxidação, redução, hidrólise, alcoolização e absorção e métodos biológicos. (LYAGIN; EFREMENKO, 2019). Em geral, os métodos de desintoxicação química e física apresentam limitações podendo apresentar perda de nutrientes, além de precisarem de equipamentos caros.

Um método estabelecido que pode ser utilizado para degradação de várias micotoxinas é o uso do gás ozônio. A ozonização é uma tecnologia fácil, que não deixa

resíduos nocivos após a aplicação. O ozônio é usado para desinfetar cereais, vegetais e frutas, ou para desintoxicar micotoxinas (PORTO et al., 2019).

Gás Ozônio

O ozônio (O_3) é um forte oxidante que tem muitos usos na indústria alimentícia, como remediação de água, degradação de pesticidas e descontaminação de produtos frescos (MARSHALL et al., 2020).

O gás ozônio (O_3), ou oxigênio triatômico, é uma forma alotrópica do oxigênio, que pode ser produzida naturalmente como resultado de relâmpagos ou radiação ultravioleta ou de forma sintética pelo método de descarga por efeito corona (KIM et al., 1999). Na geração do ozônio, segundo Novak e Yuan (2007), moléculas de oxigênio (O_2) quando expostas a descarga elétrica são dissociadas, produzindo radicais livres altamente reativos. Esses radicais livres reagem com outras moléculas de oxigênio, formando o O_3 .

Durante o processo de descontaminação, o ozônio pode ser aplicado de três formas diferentes: seco, agudo e úmido (MALLAKIAN et al., 2017). A degradação da aflatoxina pelo ozônio ocorre devido a um ataque eletrofílico na dupla ligação C8-C9 do anel furano em sua estrutura molecular, levando à formação de ozonídeos primários, que são seguidos de rearranjo em aldeídos, cetonas e ácidos orgânicos (JALALI; AVAGYAN, 2016).

Histórico de uso do ozônio

Em 1840, Christian Friedrich Schonbein, usou faíscas elétricas em uma câmara de ar fechada para produzir um gás azul pálido com um odor distinto e o identificou como ozônio. Na Primeira Guerra Mundial, as propriedades antimicrobianas do ozônio foram empregadas para tratar feridas e queimaduras (SINGH et al., 2019).

O ozônio é um oxidante altamente reativo e poderoso que tem sido utilizado na indústria química como agente oxidante e também é amplamente utilizado no tratamento de água potável (BATAGODA et al., 2018).

O ozônio foi aprovado pela Food and Drug Administration (FDA) e reconhecido como seguro para desinfecção de água engarrafada no início de 1982, e

seu uso foi estendido ao tratamento de alimentos, armazenamento e processamento em 1999. Em 2001, o ozônio foi formalmente aprovado como agente antimicrobiano para sanitização de alimentos, a fim de combater a contaminação ambiental e ocupacional relacionada ao uso de cloro (FDA, 2022). Algumas vantagens do O₃ em relação a outros oxidantes químicos são que os precursores de ozônio são abundantes, o ozônio pode ser aplicado tanto em forma gasosa ou aquosa, não deixa qualquer resíduo após o contato, pode ser gerado no local e tem descarte sem perigo (PANDISELVAM et al., 2019).

De fato, seu uso não deixa resíduos nos alimentos, por esta razão, a aplicação de O₃ nas cadeias alimentares foi considerada segura e eficaz pela OMS, sendo reconhecida como uma “tecnologia verde” (EPA, 1999). Com um potencial redox de 2,07 mV, o O₃ deve ser considerado um dos desinfetantes oxidantes mais poderosos, sendo 1,5 e 1,3 vezes mais forte que o cloro e o peróxido de hidrogênio contra bactérias, vírus, algas e fungos (TROMBETE et al., 2016). O gás ozônio tem eficácia comprovada na inibição ou retardamento do desenvolvimento de fungos dos gêneros *Aspergillus*, *Fusarium*, *Geotrichum*, *Myrothecium* e *Mucor*, dentre outros, em produtos agrícolas (ALENCAR et al., 2012).

Estudos mostraram que a ozonização, expondo os alimentos ao gás O₃, pode reduzir a viabilidade de contaminantes bacterianos e fúngicos e reduzir o acúmulo de metabólitos microbianos (AFSAH-HEJRI et al., 2020).

Mecanismo de ação do ozônio

O ozônio é capaz de desativar organismos nocivos, como micróbios patogênicos e pragas de armazenamento, oxidando seus componentes celulares vitais. Especificamente, o O₃ atua contra os lipídios insaturados nas membranas das células microbianas, causando um vazamento de seu conteúdo e, eventualmente, a lise microbiana. Além desse dano, o O₃ causa oxidação generalizada de proteínas celulares internas, reduzindo seu crescimento e causando rápida morte celular (GUZEL-SEYDIM et al., 2004).

Como já foi citado, uma grande vantagem da ozonização é que todo ozônio se decompõe para produzir oxigênio, não deixando resíduos nos alimentos. Portanto, os produtos tratados com O₃ são seguros para consumo e sua vida útil pode ser

aumentada. No entanto, a eficácia do O₃ no processamento de alimentos depende de vários fatores, como o método, a concentração, o tempo e o momento da aplicação de O₃, os microrganismos a serem inativados e o tipo de alimento. Nem sempre a ozonização é um processo eficaz, pois o O₃ também pode causar alterações nos alimentos como alterações nas características sensoriais, perda de cor e oxidação lipídica (ZHU, 2018). Por esta razão, é importante estudar não apenas o efeito da ozonização na degradação de micotoxinas, mas também o efeito deste método na qualidade geral do produto (LI et al., 2015; ALEXANDRE et al., 2017).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEBIYI, J. A.; AYITESI, E.; ADEBO, O. A.; CHANGWA, R.; NJOBEH, P. B. Food fermentation and mycotoxin detoxification: An African perspective. **Food Control**, v. 106, p. 106731, 2019.

ADEYEYE, S. A. O. Aflatoxigenic fungi and mycotoxins in food: a review. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 60, n. 5, p. 709-721, 2020.

AFSAH-HEJRI, LEILI; HAJEB, PARVANEH; EHSANI, REZA J. Application of ozone for degradation of mycotoxins in food: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 19, n. 4, p. 1777-1808, 2020.

ALENCAR, E.R.; FARONI, L.R.D.; SOARES, N.F.F.; SILVA, W.A.; CARVALHO, M.C.S. Efficacy of ozone as a fungicidal and detoxifying agent of aflatoxins in peanuts. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.92, p.899-905, 2012.

ALEXANDRE, A. P.; CASTANHA, N.; CALORI-DOMINGUES, M. A.; AUGUSTO, P. E. Ozonation of whole wheat flour and wet milling effluent: Degradation of deoxynivalenol (DON) and rheological properties. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 52, n. 7, p. 516-524, 2017.

BITENCOURT, M. A. F.; RESENDE, O.; JUNIOR, W. N. F.; SANTOS, M. R. B.; ANDRADE, É. G. Pós-colheita, morfometria e rendimento de castanhas-do-Brasil da região amazônica. **Alimentos: Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente**, v. 1, n. 10, p. 13-38, 2020.

BATAGODA, J. H.; HEWAGE, S. D. A.; MEEGODA, J. N. Nano-ozone bubbles for drinking water treatment. **Journal of Environmental Engineering and Science**, v. 14, n. 2, p. 57-66, 2018.

BOTELHO, F. M.; BOSCHIROLI, N. J.; BOTELHO, S. D. C.; DE OLIVEIRA, G. H.; HAUTH, M. R. Sorption isotherms of Brazil nuts. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, p. 776-781, 2019.

BRASIL. **Resolução nº 7, de 18 de fevereiro de 2011**. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2011/res0007_18_02_2011_rep.html>. Acesso em: 02 out. de 2022.

BRONDIZIO, E. S.; ANDERSSON, K.; DE CASTRO, F.; FUTEMMA, C.; SALK, C.; TENGÖ, M.; SIANI, S. M. Making place-based sustainability initiatives visible in the Brazilian Amazon. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v.49, p.66-78, 2021.

CALDERARI, T. O.; IAMANAKA, B. T.; FRISVAD, J. C.; PITT, J. I.; SARTORI, D.; PEREIRA, J. L.; TANIWAKI, M. H. The biodiversity of *Aspergillus* section *Flavi* in brazil nuts: from rainforest to consumer. **International journal of food microbiology**, v. 160, n. 3, p. 267-272, 2013.

CARDOSO, B. R.; DUARTE, G. B. S.; REIS, B. Z.; COZZOLINO, S. M. Brazil nuts: Nutritional composition, health benefits and safety aspects. **Food Research International**, v. 100, p. 9-18, 2017.

CHEN, R.; MA, F.; LI, P.W.; ZHANG, W.; DING, X.X.; ZHANG, Q.; LI, M.; WANG, Y.R.; XU, B.C. Effect of ozone on aflatoxins detoxification and nutritional quality of peanuts. **Food chemistry**, v.146, p.284-288, 2014.

EPA. United States Environmental Protection Agency. Office of Water Programs Operations. **Alternative disinfectants and oxidants guidance manual**, v. 99, n.14, 1999.

ESKOLA, M.; ALTIERI, A.; GALOBART, J. Overview of the activities of the European Food Safety Authority on mycotoxins in food and feed. **World Mycotoxin Journal**, v. 11, n. 2, p. 277-289, 2018.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (2021). **Statistical database**. Disponível em: <www.fao.org>. Acesso em: 02 out. de 2021.

FDA (Food and Drug Administration). **Direct Food Substances Affirmed as Generally Recognized as Safe**. Disponível em: <<https://www.fda.gov/food/generally-recognized-safe-gras>>. Acesso em: 17 out. 2022.

FERRARI, C. K. Anti-atherosclerotic and cardiovascular protective benefits of Brazilian nuts. **Frontiers in Bioscience-Scholar**, v. 12, n. 1, p. 38-56, 2020.

Gallo, A.; Solfrizzo, M.; Epifani, F.; Panzarini, G.; Perrone, G. Effect of temperature and water activity on gene expression and aflatoxin biosynthesis in *Aspergillus flavus* on almond medium. **International journal of food microbiology**, v. 217, p. 162-169, 2016.

GUARIGUATA, M. R.; CRONKLETON, P.; DUCHELLE, A. E.; ZUIDEMA, P. A. Revisiting the 'cornerstone of Amazonian conservation': a socioecological assessment of Brazil nut exploitation. **Biodiversity and Conservation**, v. 26, n. 9, p. 2007-2027, 2017.

GUZEL-SEYDIM, Z. B.; GREENE, A. K.; SEYDIM, A. C. Use of ozone in the food industry. **LWT-Food Science and Technology**, v. 37, n. 4, p. 453-460, 2004.

IARC (International Agency for Research on Cancer). **Mycotoxin exposure and human cancer risk: a systematic review of epidemiological studies**. Disponível em: <<https://www.iarc.who.int>>. Acesso em: 02 out. 2022.

IBGE (Instituto Brasileiro De Geografia e Estatística). **Produção extrativa vegetal - Quantidade produzida na extração vegetal por tipo de produto extrativo.**

Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/castanha-do-para/br>>. Acesso em: 02 out. 2022.

JAGER, A. V.; TONIN, F. G. Analytical Methods for Detection and Quantification of Aflatoxins. **Aflatoxins in Food**. Springer, Cham, p. 161-193, 2021.

JALALI, L.; AVAGYAN, G. Evaluation of contamination of *Aspergillus flavus* and aflatoxin production in pistachio cultivars and investigation of a chemical controlling method. **J. Nuts**, v. 7, p. 51-58, 2016.

JAVANMARDI, F.; KHODAEI, D.; SHEIDAEI, Z.; BASHIRY, M.; NAYEBZADEH, K.; VASSEGHIAN, Y.; MOUSAVI KHANEGHAH, A. Decontamination of aflatoxins in edible oils: A comprehensive review. **Food Reviews International**, p. 1-17, 2020.

KHANEGHAH, A. M.; FAKHRI, Y.; GAHRUIE, H. H.; NIAKOUSARI, M.; SANT'ANA, A. S. Mycotoxins in cereal-based products during 24 years (1983–2017): A global systematic review. **Trends in food science & technology**, v. 91, p. 95-105, 2019.

KIM, J.G.; YOUSEF, A.E.; DAVE, S. Application of ozone for enhancing the microbiological safety and quality of foods: a review. **Journal of Food Protection**. v.62, n.9, p.1071-1087, 1999.

KUMAR, P.; GUPTA, A.; MAHATO, D. K.; PANDHI, S.; PANDEY, A. K.; KARGWAL, R.; HARAKEH, S. Aflatoxins in Cereals and Cereal-Based Products: Occurrence, Toxicity, Impact on Human Health, and Their Detoxification and Management Strategies. **Toxins**, v. 14, n. 10, p. 687, 2022.

LI, M. M.; GUAN, E. Q.; BIAN, K. Effect of ozone treatment on deoxynivalenol and quality evaluation of ozonised wheat. **Food Additives & Contaminants: Part A**, v. 32,

n. 4, p. 544-553, 2015. LUO, Y.; LIU, X.; LI, J. Updating techniques on controlling mycotoxins-A review. **Food control**, v. 89, p. 123-132, 2018.

LYAGIN, I.; EFREMENKO, E. Enzymes for detoxification of various mycotoxins: Origins and mechanisms of catalytic action. **Molecules**, v. 24, n. 13, p. 2362, 2019.

MALLAKIAN, S.; REZANEZHAD, R.; JALALI, M.; GHOBADI, F. The effect of ozone gas on destruction and detoxification of aflatoxin. **Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège**, v. 86, n. 1, p. 1-6, 2017.

MARSHALL, H.; MENEELY, J. P.; QUINN, B.; ZHAO, Y.; BOURKE, P.; GILMORE, B. F.; ELLIOTT, C. T. Novel decontamination approaches and their potential application for post-harvest aflatoxin control. **Trends in Food Science & Technology**, v. 106, p. 489-496, 2020.

MENEGUETTI, N. F. S. P.; SOUZA, M. P. de; SOUZA FILHO, T. A. de. Estruturas de governança na cadeia produtiva da castanha-da-amazônia. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, v. 5, n. 3, p. 26-43, 2015.

NOVAK, J. S.; YUAN, J.T. 10 The Ozonation Concept: Advantages of Ozone Treatment and Commercial Developments. **Advances in thermal and non-thermal food preservation**, p. 185, 2007.

O'NEIL, C. E.; NICKLAS, T. A. Tree nut consumption is associated with better nutrient adequacy and diet quality in adults: National Health and Nutrition Examination Survey 2005–2010. **Nutrients**, v. 7, n. 1, p. 595-607, 2015.

PANDISELVAM, R.; SUBHASHINI, S.; BANUU PRIYA, E. P.; KOTHAKOTA, A.; RAMESH, S. V.; SHAHIR, S. Ozone based food preservation: A promising green technology for enhanced food safety. **Ozone: Science & Engineering**, v. 41, n. 1, p. 17-34, 2019.

PORTO, Y. D.; TROMBETE, F. M.; FREITAS-SILVA, O.; DE CASTRO, I. M.; DIREITO, G. M.; ASCHERI, J. L. R. Gaseous ozonation to reduce aflatoxins levels and microbial contamination in corn grits. **Microorganisms**, v. 7, n. 8, p. 220, 2019.

ROCHA, E. R. S.; DE CARVALHO, A. P. S.; DE ASSIS, L. S.; DE VASCONCELOS BRITO, M.; SIMÕES, D. L. V. Avaliação da qualidade microbiológica da amêndoa da Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* HBK) comercializada em feiras livres da Amazônia. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, p. e6510111285-e6510111285, 2021.

SHANG, X.; SCOTT, D.; HODGE, A.; ENGLISH, D. R.; GILES, G. G.; EBELING, P. R.; SANDERS, K. M. Dietary protein from different food sources, incident metabolic syndrome and changes in its components: An 11-year longitudinal study in healthy community-dwelling adults. **Clinical Nutrition**, v. 36, n. 6, p. 1540-1548, 2017.

SILVA, J. V. B. D.; OLIVEIRA, C. A. F. D.; RAMALHO, L. N. Z. An overview of mycotoxins, their pathogenic effects, foods where they are found and their diagnostic biomarkers. **Food Science and Technology**, 2021.

SINGH, J.; MEHTA, A. Rapid and sensitive detection of mycotoxins by advanced and emerging analytical methods: A review. **Food science & nutrition**, v. 8, n. 5, p. 2183-2204, 2020.

SINGH, V.; RISHABH, G.; SANDEEP, K. Role of ozone therapy and cancer: myth or reality. **JMSCR**, v. 7, p. 720-727, 2019.

TANIWAKI, M. H.; FRISVAD, J. C.; FERRANTI, L. S.; DE SOUZA LOPES, A.; LARSEN, T. O.; FUNGARO, M. H. P.; IAMANAKA, B. T. Biodiversity of mycobiota throughout the Brazil nut supply chain: From rainforest to consumer. **Food microbiology**, v. 61, p. 14-22, 2017.

TAKEUCHI, K. P.; EGEE, M. B. Bioactive compounds of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa* Bonpl.): Nutritional and health aspects. **Bioactive compounds in underutilized fruits and nuts**, p. 1-15, 2019.

TROMBETE, F.; FREITAS-SILVA, O.; SALDANHA, T.; VENÂNCIO, A.; FRAGA, M. E. Ozone against mycotoxins and pesticide residues in food: Current applications and perspectives. **Int Food Res J**, v. 26, p. 2545-2556, 2016.

USDA (United States Department of Agriculture). **Food Data Central – Nuts, Brazilnuts, Dried, Unblanched**. Disponível em: <<https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/170569/nutrients>>. Acesso em: 10 out. 2022.

YANG, J. Brazil nuts and associated health benefits: A review. **LWT-Food science and technology**, v. 42, n. 10, p. 1573-1580, 2009.

TANIWAKI, M. H.; PITT, J. I.; COPETTI, M. V.; TEIXEIRA, A. A.; IAMANAKA, B. T. Understanding mycotoxin contamination across the food chain in Brazil: Challenges and opportunities. **Toxins**, v. 11, n. 7, p. 411, 2019.

ZHU, F. Effect of ozone treatment on the quality of grain products. **Food chemistry**, v. 264, p. 358-366, 2018.

CAPÍTULO I

**Ozonização de castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K.):
efeito da altura de coluna no processo de saturação e alterações na
qualidade.**

OZONIZAÇÃO DE CASTANHA-DO-BRASIL (*Bertholletia excelsa* H.B.K.): EFEITO DA ALTURA DA COLUNA NO PROCESSO DE SATURAÇÃO E ALTERAÇÕES NA QUALIDADE

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi estudar o processo de saturação em coluna contendo castanha-do-Brasil e possíveis alterações na qualidade do produto. Inicialmente as amostras de castanha-do-Brasil foram acondicionadas em coluna cilíndrica de PVC de 15 cm de diâmetro e 110 cm de altura. Foram adotadas as concentrações do gás ozônio de 2,5, 4,5, 9,0 e 14,0 mg L⁻¹ e vazão de 3,0 L min⁻¹, na temperatura de 25 °C. O gás ozônio foi injetado na base da coluna cilíndrica e os valores adotados de altura da coluna de grãos foram de 0, 0,25, 0,50, e 0,75 m. Determinaram-se o tempo de concentração e a concentração de saturação. Na avaliação de possíveis alterações na qualidade de castanhas-do-Brasil ozonizadas foram determinados a umidade, coloração e variáveis qualitativas do óleo bruto, com tempos de exposição de 0, 3, 6, 9 e 12 h. Para avaliação da qualidade do óleo bruto extraído de castanhas ozonizadas foram analisadas o teor de ácidos graxos livres, o índice de peróxido e o índice de iodo. A elevação do período de ozonização promoveu aumento da concentração do ozônio para todas as concentrações iniciais do gás. No que se refere aos valores de tempo de saturação, à medida que se elevou a concentração inicial do gás, houve redução do tempo de saturação, nas diferentes alturas de coluna do produto. Não houve variação da umidade do produto em decorrência da ozonização. A ozonização não provocou alterações significativas na cor e no óleo bruto, em decorrência da interação tripla entre altura da coluna do produto, concentração do ozônio e tempo de exposição. É possível concluir que a altura da coluna do produto influencia o tempo e a concentração de saturação, durante o processo de ozonização. O uso do ozônio nas condições adotadas no presente estudo não afeta a qualidade da castanha-do-Brasil, considerando-se a cor do produto e características do óleo bruto, de tal forma a inviabilizar a comercialização.

Palavras-chave: *Ozônio; tempo de saturação; concentração de saturação; coloração; óleo bruto.*

OZONIZATION OF BRAZIL NUTS (*Bertholletia excelsa* H.B.K.): EFFECT OF COLUMN HEIGHT ON THE SATURATION PROCESS AND CHANGES IN QUALITY.

ABSTRACT

The objective of the present work was to study the process of saturation in a column containing Brazil nuts and possible changes in the quality of the product. Initially, the Brazil nut samples were placed in a cylindrical PVC column measuring 15 cm in diameter and 110 cm in height. Ozone gas concentrations of 2.5, 4.5, 9.0 and 14.0 mg L⁻¹ and flow rate of 3.0 L min⁻¹ at a temperature of 25 °C were adopted. Ozone gas was injected at the base of the cylindrical column and the values adopted for the height of the grain column were 0, 0.25, 0.50, and 0.75 m. The concentration time and the saturation concentration were determined. In the evaluation of possible changes in the quality of ozonated Brazil nuts, the moisture, color and qualitative variables of the crude oil were determined. To evaluate the quality of the crude oil extracted from ozonized nuts, the free fatty acid content, the peroxide index and the iodine index were analyzed. The increase in the ozonation period resulted in an increase in the ozone concentration for all the initial concentrations of the gas. With regard to the saturation time values, as the initial concentration of the gas was increased, there was a reduction in the saturation time at different column heights of the product. There was no variation in product moisture as a result of ozonation. Ozonation did not cause significant changes in color and crude oil. It is possible to conclude that the height of the product column influences the saturation time and concentration during the ozonation process. The application of ozone under the conditions adopted does not affect the quality of the product in such a way as to make the commercialization of the product unfeasible.

Keywords: *Ozone; saturation time; saturation concentration; color; crude oil.*

INTRODUÇÃO

A castanha-do-Brasil, nativa da região amazônica, do gênero *Bertholletia* é uma árvore monotípica da família Lecythidaceae, e sua única espécie, *B. excelsa*, produz sementes grandes e ricas em óleo, que são de interesse biológico e nutricional, pois acumulam altos níveis de selênio e outros minerais (LIMA et al, 2019).

A castanha-do-Brasil é o segundo produto extrativista mais rentável da região amazônica, perdendo apenas para o açaí, com produção de 33.118 toneladas (IBGE 2020). Apresenta um elevado valor nutricional, produzindo benefícios para a saúde, tornando-os um valioso produto de exportação (CARDOSO et al., 2017). No entanto, uma das principais preocupações relacionada a segurança da castanha-do-Brasil é a contaminação com fungos aflatoxigênicos (GALLO et al., 2016). As aflatoxinas são de elevada toxicidade, aguda e crônica, podendo causar câncer, sendo o fígado o órgão mais afetado (AFSAH-HEJRI et al., 2020).

À medida que a indústria de alimentos cresce, tornando-se cada vez mais competitiva, é importante desenvolver produtos de excelente qualidade, prontos para serem consumidos de forma segura. Um dos focos de pesquisa atualmente é a aplicação do ozônio, que é uma tecnologia não térmica, apresenta-se como um processo livre de resíduos e que é capaz de degradar micotoxinas nos alimentos (SUJAYASREE et al., 2022).

O ozônio possui elevado potencial oxidativo, sendo capaz de gerar radicais, principalmente quando em concentrações elevadas, o que afeta a estrutura das moléculas das micotoxinas. Isso pode causar modificações dessas substâncias, formando assim produtos com menor peso molecular e toxicidade reduzida, implicando na detoxificação dos alimentos contaminados (PANDISELVAM et al., 2019).

Considerando-se que o ozônio é altamente reativo quando em contato com material orgânico, é necessário que seja feita a avaliação cinética de decomposição do gás em meio contendo produtos distintos de origem vegetal, determinando assim parâmetros como concentração e tempo de saturação e possíveis alterações na qualidade do produto. Encontram-se na literatura diversos trabalhos, nos quais são avaliados o processo de saturação no ozônio. Entretanto, há somente um relato que trata do processo de saturação em castanha-do-Brasil (OLIVEIRA et al., 2020). Nesse

estudo, os autores utilizaram amostras de 1,0 kg, não considerando, dessa forma a altura da coluna do produto, que é variável essencial para aplicação do processo de ozonização.

Diante do exposto, objetivou-se com o presente estudo, avaliar o processo de ozonização de castanha-do-Brasil, considerando-se diferentes combinações de concentração inicial do gás e altura da coluna do produto, além de possíveis alterações na cor do produto e na qualidade do óleo bruto.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado nos Laboratórios de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, de Microbiologia de Alimentos e de Análise de Alimentos, localizados na Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, FAV, todos na Universidade de Brasília, UnB.

Obtenção do gás ozônio

O gás ozônio foi obtido por meio de um gerador de ozônio baseado no método de Descarga por Barreira Dielétrica. No processo de geração do ozônio, foi utilizado como insumo oxigênio (O_2) com grau de pureza de aproximadamente 90%, isento de umidade, obtido de concentrador de oxigênio acoplado ao gerador de ozônio.

Processo de saturação do ozônio em coluna contendo castanha-do-Brasil

Inicialmente as amostras de castanha-do-Brasil foram acondicionadas em coluna cilíndrica de PVC de 15 cm de diâmetro e 110 cm de altura (Figura 1). Na base da coluna cilíndrica, foi instalada chapa metálica perfurada com 1,4 mm de espessura, 22,6% de área perfurada e furos de 5,0 mm de diâmetro para a sustentação das amostras. Foram adotadas as concentrações do gás ozônio de 2,5 mg L⁻¹, 4,5 mg L⁻¹, 9,0 mg L⁻¹ e 14,0 mg L⁻¹ e vazão volumétrica de 3,0 L min⁻¹, na temperatura de 25 °C. Essas concentrações de ozônio foram adotadas, considerando-se o estudo desenvolvido por Oliveira et al. (2020), que analisaram o efeito do ozônio sobre *Aspergillus flavus* e na qualidade da castanha-do-Brasil.

O gás ozônio foi injetado na base da coluna cilíndrica e os valores adotados de altura da coluna de grãos foram de 0, 0,25, 0,50, e 0,75 m (Figura 1). Foi feita a determinação da concentração residual do ozônio após a passagem do gás pela coluna cilíndrica contendo castanha-do-Brasil, adotando-se diferentes alturas da coluna de grãos. Inicialmente foi avaliado o processo de saturação do ozônio, quantificando-se a concentração residual, pelo método iodométrico, até que a mesma permanecesse constante. Utilizou-se destruidor térmico para degradação do ozônio residual (Figura 1).

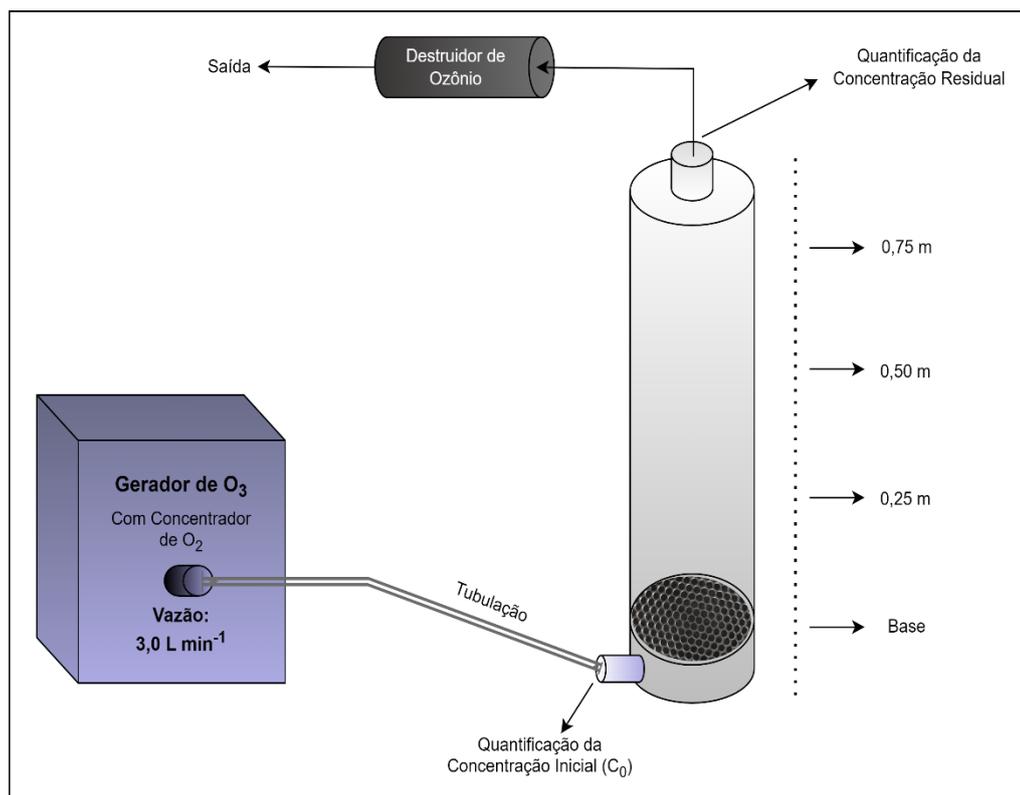


Figura 1. Esquema experimental para ozonização da castanha-do-Brasil

A concentração de ozônio antes e após a passagem do gás pela coluna de produto foi determinada pelo método iodométrico, descrito por Clescerl et al. (2000), borbulhando-se o gás contendo ozônio em 50 mL de solução de iodeto de potássio (KI) 1 N, com produção de Iodo (I_2). Para garantir o deslocamento da reação para a produção de I_2 , a solução foi acidificada com 2,5 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 1 N, seguida de titulação com tiosulfato de sódio ($Na_2S_2O_3$) 0,01 N. Como indicador foi utilizada solução de amido à 1%.

Para relacionar concentração residual do gás ozônio com o tempo, foi ajustada equação sigmoideal aos dados obtidos (Equação 1):

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

em que

C = concentração do gás ozônio ($mg\ L^{-1}$);

t = tempo (min);

a , b e c = são as constantes da equação.

Utilizaram-se as constantes b e c para determinar o tempo de saturação para cada concentração inicial do gás (Equação 2) e, posteriormente, obter concentração de saturação:

$$t_{Sat}=b+2c \quad \text{Equação 2}$$

em que, t_{Sat} = tempo de saturação (min).

Análises qualitativas da castanha-do-Brasil ozonizada

Nessa etapa, foram adotadas as concentrações de entrada de 2,5 mg L⁻¹, 4,5 mg L⁻¹, 9,0 mg L⁻¹ e 14,0 mg L⁻¹ e vazão volumétrica de 3,0 L min⁻¹, na temperatura de 25 °C. Os períodos de ozonização foram de 0 (não ozonizadas), 3, 6, 9 e 12 h e altura máxima da coluna de produto de 0,75 m. Amostras de 80 g de castanha-do-Brasil foram previamente acondicionadas em bolsas de organza e dispostas a 0, 0,25, 0,50 e 0,75 m da coluna de cilíndrica (Figura 1). Para cada combinação de concentração de ozônio, altura da coluna de produto e período de exposição, adotaram-se três repetições. Na avaliação de possíveis alterações na qualidade de castanhas-do-Brasil ozonizadas foram avaliados a umidade, coloração e variáveis qualitativas do óleo bruto. Para avaliação da qualidade do óleo bruto extraído de castanhas ozonizadas foram analisados o teor de ácidos graxos livres e o índice de peróxido

Para determinação da umidade das castanhas-do-Brasil sem casca, foi utilizado o método de estufa com circulação forçada de ar, à temperatura de 103±2 °C, até peso constante, conforme ISO 665-2000 (UNECE, 2000).

A avaliação da coloração das castanhas-do-Brasil foi realizada no espectrofotômetro Colorquest XE (HunterLab, Reston, United States), obtendo-se os valores das coordenadas L* (mensurável em termos de intensidade de branco a preto), a* (mensurável em termos de intensidade de branco a preto) e b* (mensurável em termos de intensidade de amarelo e azul) do sistema Hunter. A partir das coordenadas a* e b* foi possível obter tonalidade de cor h (Equação 1) e à saturação da cor ou croma C (Equação 2) (MASKAN, 2001).

$$h=\arctang(b/a) \quad (1)$$

$$C=\sqrt{(a^2+b^2)} \quad (2)$$

A extração de lipídios, para a análise do teor de ácidos graxos livres e índice de peróxido, foi realizada pelo método Bligh e Dyer (1959). Foram pesados 2,5 g de amostras trituradas, posteriormente transferidas para o tubo Falcon de 50 mL. Foram adicionados 5,0 mL de clorofórmio, 10,0 mL de metanol e 4,0 mL de água destilada. A mistura foi homogeneizada em agitador rotativo por 30 min. Foram adicionados mais 5 mL de clorofórmio e 5 mL de solução de sulfato de sódio a 1,5%. Nova agitação foi realizada por 2 min e centrifugado a 1.000 rpm por dois min. Em seguida, a camada metanólica superior foi pipetada e descartada. A camada inferior foi coletada e acondicionada, em seguida, em tubo de 50 mL. A amostra coletada na camada inferior foi filtrada em funil com papel de filtro qualitativo. O filtrado foi coletado em um béquer de 50 mL, que foi levado posteriormente à estufa a 40 °C para a evaporação do clorofórmio residual. Esse procedimento foi repetido oito vezes para cada repetição, de tal forma que foi possível a obtenção de massa de óleo suficiente para as análises de qualidade.

A determinação do teor de ácidos graxos livres (AGL) foi realizada de acordo com as normas AOCS (1993), Método Ca 5a-40. O teor de ácidos graxos livres (AGL), expresso em porcentagem de ácido oléico. O índice de peróxido (IP) foi determinado de acordo com as normas AOCS (1993), Método Cd 8-53, com os resultados expressos em mEq kg⁻¹.

Delineamento experimental

O experimento foi realizado no Delineamento Inteiramente Casualizado, com três repetições. Na etapa, que trata do processo de saturação, o experimento foi feito no Esquema Fatorial 4 x 4, sendo quatro concentrações do gás (2,5 mg L⁻¹, 4,5 mg L⁻¹, 9,0 mg L⁻¹ e 13,5 mg L⁻¹) e quatro alturas (0, 0,25, 0,50 e 0,75 m). Na etapa que trata da avaliação do efeito na qualidade foi adotado Esquema Fatorial 4 x 4 x 5, sendo quatro concentrações (2,5 mg L⁻¹, 4,5 mg L⁻¹, 9,0 mg L⁻¹ e 13,5 mg L⁻¹), quatro alturas (0, 0,25, 0,50 e 0,75 m) e cinco períodos de ozonização (0, 3, 6, 9 e 12 horas). Foi realizada análise de variância a 5% de probabilidade e, posteriormente, teste de Tukey ou análise de regressão. Para análise de variância e teste de Tukey, foi utilizado o Software StatPlus v.5 (AnalystSoft Inc, Canada). Para a obtenção das equações de

regressão e plotagem dos gráficos, foi utilizado o software SigmaPlot v.10 (Systat Software Inc, Germany).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Processo de saturação do ozônio em coluna contendo castanha-do-Brasil

Apresenta-se na Figura 2 a concentração residual do ozônio em castanha-do-Brasil em diferentes combinações de altura da coluna (0, 0,25, 0,50 e 0,75 m), e concentrações de entrada do gás (2,5 mg L⁻¹, 4,5 mg L⁻¹, 9,0 mg L⁻¹ e 13,5 mg L⁻¹). Durante o processo de saturação pode se constatar que com a elevação do período de ozonização ocorreu aumento da concentração do ozônio para todas as concentrações iniciais do gás. Outros estudos corroboram tais resultados (ROBERTO et al., 2016; SOUZA et al., 2018; SILVA et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2020). O ozônio transportado através da massa de grãos é muito reativo e age a partir de duas etapas. Em princípio, o gás reage com sítios ativos na superfície do produto, o que acelera sua degradação. Então, à medida que o ozônio se move através da massa de grãos, mais sítios ativos reagem com o gás, e a taxa de degradação diminui.

No que se refere aos valores de tempo de saturação, obtidos a partir das equações contidas na Tabela 1, verificou-se expressivo efeito da concentração inicial do gás. Em geral, à medida que se elevou a concentração inicial do gás (C_0), houve redução do tempo de saturação, nas diferentes alturas de coluna do produto. Exceção a essa tendência foi observada na altura da coluna de 0,25 m, em que na concentração do ozônio de 2,5 mg L⁻¹, obteve-se tempo de saturação de 59,5 min. Por outro lado, quando se adotou a concentração do gás de 4,5 mg L⁻¹, o tempo de saturação foi de 65,1 min. A maior diferença entre os tempos de saturação foi obtida quando se comparou os valores obtidos para as concentrações de 2,5 mg L⁻¹ (65,5 min) e 13,5 mg L⁻¹ (26,5 min), quando se adotou a altura da coluna de produto de 0,50 m. No que se refere à concentração de saturação (C_{sat}), observou-se elevação à medida que se elevou a concentração inicial do gás, sendo essa tendência mais acentuada na altura de 0,50 m de produto.

Quanto a relação C_{sat}/C_0 , o maior valor obtido foi de 0,92, quando se adotou a concentração inicial de 13,5 mg L⁻¹, na altura da coluna de produto de 0,25 m (Tabela 1). Por outro lado, o menor valor foi de 0,49, para a concentração inicial de 2,5 mg L⁻¹ e altura da coluna de grãos de 0,75 m. É importante salientar que o tempo de saturação de 65,1 min, na concentração do ozônio de 4,5 mg L⁻¹ e para altura da

coluna de 0,25 m, está associado a relação C_{Sat}/C_0 de 0,75. Todavia, a relação C_{Sat}/C_0 foi de 0,61 quando se adotou concentração do ozônio de $2,5 \text{ mg L}^{-1}$, para a mesma altura da coluna de produto. Dessa forma, afirma-se que em estudos do processo de saturação do ozônio é essencial que variáveis como tempo de saturação e concentração de saturação não sejam analisados isoladamente e a relação C_{Sat}/C_0 seja considerada.

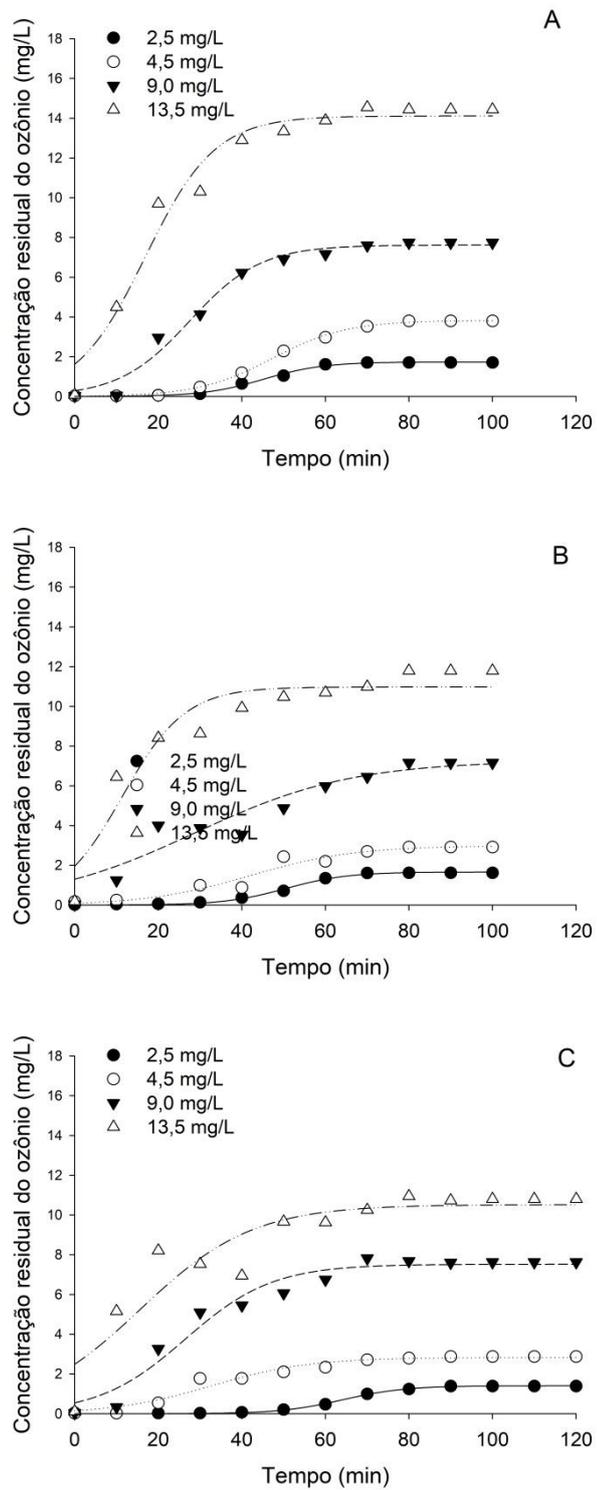


Figura 2. Concentração residual do ozônio em castanha-do-Brasil em diferentes combinações de altura da coluna (0,25 m – A; 0,50 m – B; 0,75 m – C) e concentrações de entrada do gás (2,5; 4,5; 9,0 e 14,5 mg/L) em função do tempo.

Tabela 1. Equações de regressão ajustadas e respectivos coeficientes de determinação (R^2) para concentração residual do ozônio (mg L^{-1}) em diferentes combinações de altura da coluna e concentrações de entrada do gás em função do tempo

Altura da coluna (m)	Concentração de entrada (C_0 ; mg L^{-1})	Equações ajustadas	R^2	EPE	Tempo de saturação (t_{Sat} , min)	Concentração de saturação (C_{Sat} , mg L^{-1})	C_{Sat}/C_0
0,25	2,5	$\hat{y} = \frac{1,732}{1+e^{-\left(\frac{x-45,167}{7,180}\right)}}$	0,99	0,0615	59,5	1,52	0,61
	4,5	$\hat{y} = \frac{3,824}{1+e^{-\left(\frac{x-47,265}{8,893}\right)}}$	0,99	0,0705	65,1	3,37	0,75
	9,0	$\hat{y} = \frac{7,615}{1+e^{-\left(\frac{x-27,561}{8,485}\right)}}$	0,98	0,4319	44,5	6,70	0,74
	13,5	$\hat{y} = \frac{14,111}{1+e^{-\left(\frac{x-16,982}{8,322}\right)}}$	0,97	0,9477	33,6	12,42	0,92
0,50	2,5	$\hat{y} = \frac{1,660}{1+e^{-\left(\frac{x-50,454}{7,379}\right)}}$	0,99	0,0539	65,2	1,46	0,58
	4,5	$\hat{y} = \frac{2,987}{1+e^{-\left(\frac{x-42,133}{12,396}\right)}}$	0,95	0,2828	66,9	2,58	0,57
	9,0	$\hat{y} = \frac{7,272}{1+e^{-\left(\frac{x-28,788}{18,875}\right)}}$	0,86	1,0207	66,5	6,40	0,71
	13,5	$\hat{y} = \frac{10,976}{1+e^{-\left(\frac{x-11,460}{7,507}\right)}}$	0,91	1,1468	26,5	9,67	0,72
0,75	2,5	$\hat{y} = \frac{1,404}{1+e^{-\left(\frac{x-64,127}{7,476}\right)}}$	0,99	0,0284	79,1	1,23	0,49
	4,5	$\hat{y} = \frac{2,828}{1+e^{-\left(\frac{x-32,850}{11,709}\right)}}$	0,96	0,2320	56,3	2,49	0,55
	9,0	$\hat{y} = \frac{7,521}{1+e^{-\left(\frac{x-26,504}{10,408}\right)}}$	0,96	0,5776	47,3	6,63	0,74
	13,5	$\hat{y} = \frac{10,520}{1+e^{-\left(\frac{x-15,746}{13,440}\right)}}$	0,86	1,2858	42,6	9,26	0,69

EPE – Erro padrão da estimativa.

Em estudo realizado por Souza et al., (2018), indicou-se a possibilidade de que as propriedades físicas possam influenciar o processo de saturação do meio poroso, além da composição química dos grãos. Oliveira et al., (2020) observaram que à medida que a concentração de ozônio aumenta, há uma redução exponencial do tempo de saturação da castanha-do-Brasil.

Qualidade da castanha-do-Brasil ozonizada

A umidade do produto permaneceu na faixa entre $2,30 \pm 0,10\%$ e $3,70 \pm 0,20\%$.

Apesar de ter sido observada ligeira tendência de redução no produto ozonizado, essa variação não foi significativa ($p > 0,05$), de acordo com a análise de variância quando se considerou a interação tripla ou dupla entre os fatores concentração de entrada do ozônio, altura da coluna de produto e tempo de exposição, assim como os fatores isoladamente.

Outros estudos demonstraram que a ozonização não influencia de forma significativa a umidade do produto ozonizado (ROBERTO et al., 2016; AFSAH-HEJRI et al., 2020; SILVA et al., 2022). É importante ressaltar que a umidade relativa durante a ozonização é determinante para a manutenção da umidade do produto e também na inativação de microrganismos. De acordo com LUO et al. (2014), o aumento da umidade relativa implica em incremento do potencial de oxidação do ozônio.

O teor de ácidos graxos livres do óleo bruto variou significativamente ($p < 0,05$), quando se considerou somente a concentração de entrada do ozônio isoladamente. Apesar disso, não foi verificada diferença significativa entre as médias ($p > 0,05$), de acordo com o teste de Tukey. Os valores médios teor de ácidos graxos livres variaram entre $0,23 \pm 0,01\%$ e $0,39 \pm 0,04\%$.

Quanto ao índice de peróxido, verificou-se variação significativa ($p < 0,05$) em decorrência da concentração de entrada do ozônio e do tempo de exposição isoladamente. Todavia, não foi verificada diferença significativa entre os valores médios do índice de peróxido, nas diferentes concentrações de entrada do gás, de acordo com o teste de Tukey ($p > 0,05$). No que se refere ao efeito do tempo de exposição ao ozônio no índice de peróxido, a variação não foi significativa, de acordo com a análise de regressão (Tabela 2 e Figura 3A). Destaca-se que o índice de peróxido do óleo bruto, cujo limite estabelecido pelo *Codex Alimentarius* é de 15 mEq kg^{-1} (FAO, 1999), permaneceu na faixa entre $6,87 \pm 0,76 \text{ mEq/kg}$ e $9,15 \pm 1,00 \text{ mEq kg}^{-1}$, respectivamente. De acordo com Oliveira et al., (2020), essa faixa de variação pode ser atribuída à qualidade inicial da matéria-prima, não devendo, portanto, ser atribuídos ao processo de ozonização.

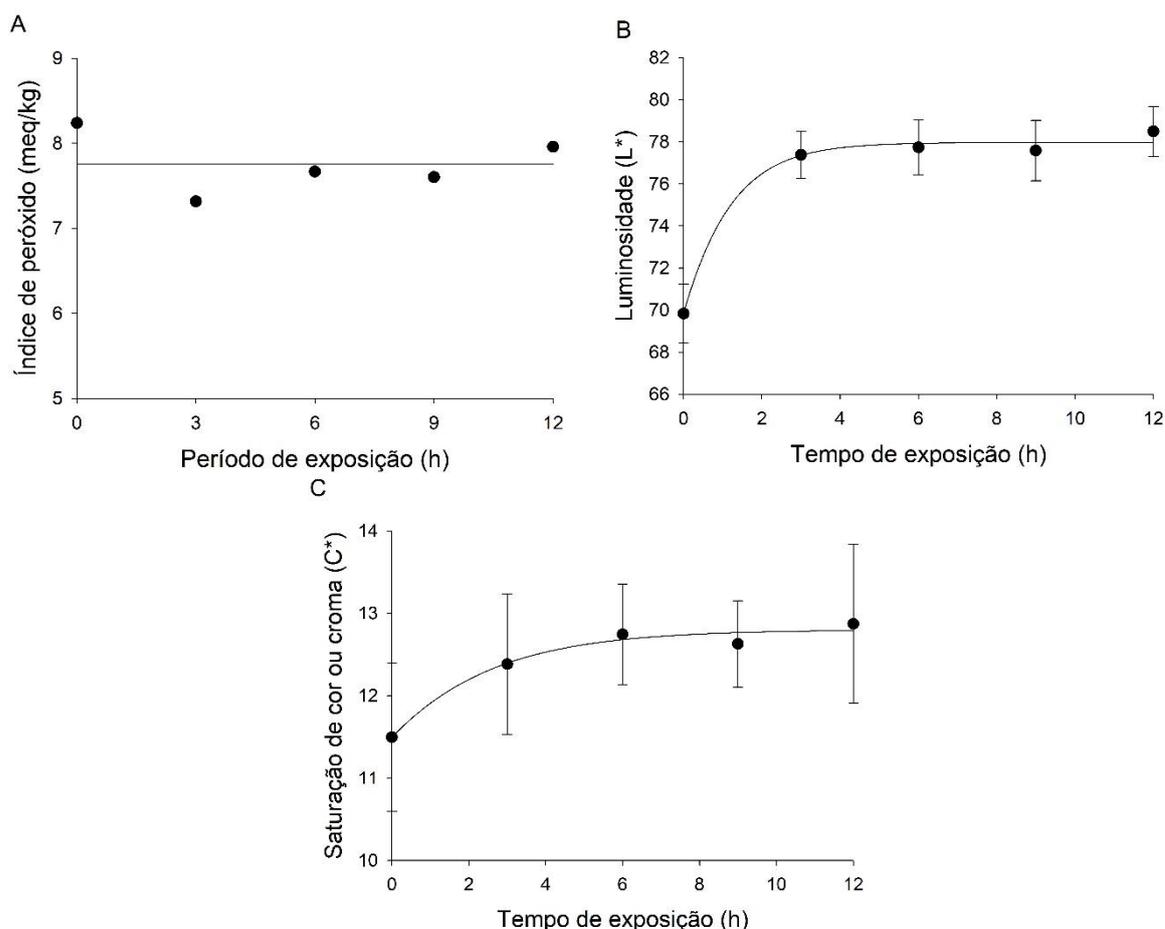


Figura 3. Curvas de regressão para índice de peróxido do óleo bruto (meq/kg, A), luminosidade (L*, B) e saturação de cor ou croma (C*, C) em castanha-do-Brasil em função do período de ozonização, independentemente da concentração de entrada do gás e da altura da coluna do produto.

Tabela 2. Equações de regressão para índice de peróxido do óleo bruto (meq/kg, A), luminosidade (L*, B) e saturação de cor ou croma (C*, C) em castanha-do-Brasil em função do período de ozonização, independentemente da concentração de entrada do gás e da altura da coluna do produto, e respectivos coeficientes de determinação (R²)

EPE – Erro padrão da estimativa

Variáveis	Equações ajustadas	R ²	EPE
Índice de peróxido do óleo bruto	$\hat{y} = \frac{77,967}{1+e^{-\left(\frac{x+2,401}{1,116}\right)}}$	-	-
Luminosidade (L*)	$\hat{y} = \frac{77,967}{1+e^{-\left(\frac{x+2,401}{1,116}\right)}}$	0,99	0,121
saturação de cor ou croma (C*)	$\hat{y} = \frac{12,800}{1+e^{-\left(\frac{x+5,248}{2,411}\right)}}$	0,99	0,479

A cor da castanha-do-Brasil foi avaliada, levando-se em consideração a luminosidade (L^*), saturação de cor ou croma (C^*) e tonalidade de cor (h^*). De acordo com a análise de variância, a luminosidade variou significativamente ($p < 0,05$) somente em decorrência da concentração de entrada do gás e tempo de exposição, quando analisados isoladamente. Por outro lado, a saturação de cor variou significativamente ($p < 0,05$), devido ao tempo de exposição isoladamente. Quanto à tonalidade de cor, houve variação significativa em decorrência da interação dupla entre concentração de entrada do gás e tempo de exposição ($p < 0,05$).

No que se refere à luminosidade, apesar da análise de variância indicar variação significativa devido a concentração de entrada do gás, não houve diferença significativa entre os valores médios, de acordo com o teste de Tukey ($p > 0,05$). Quanto ao efeito do tempo de exposição na luminosidade, verificou-se tendência de aumento à medida que se elevou o período de ozonização, sendo o incremento mais expressivo nas primeiras três horas de ozonização (Figura 3B e Tabela 2), com os valores permanecendo entre 70 e 80. Verificou-se comportamento semelhante na saturação de cor, observando-se incremento à medida que se elevou o período de exposição ao ozônio (Figura 3C e Tabela 2). No que tange a tonalidade de cor (Figura 4 e Tabela 3), observou-se tendência de incremento à medida que se elevou o tempo de exposição ao ozônio, sendo essa tendência mais pronunciada nas concentrações de entrada do gás de 9,0 e 13,5 mg L⁻¹.

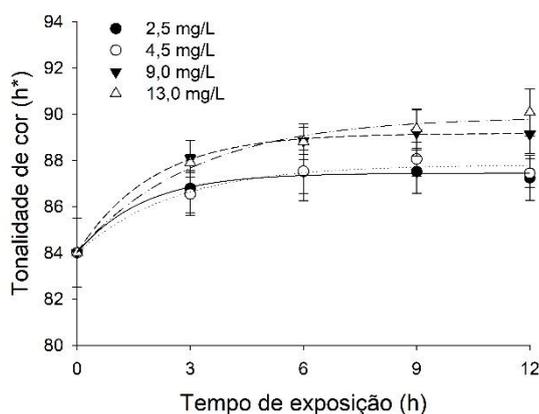


Figura 4. Curvas de regressão para tonalidade de cor (h^*) em castanha-do-Brasil em função do período de ozonização, nas concentrações de entrada do gás, independentemente da altura da coluna do produto.

Tabela 3. Equações de regressão para tonalidade de cor (h*) em castanha-do-Brasil em função do período de ozonização, nas concentrações de entrada do gás, independentemente da altura da coluna do produto, e respectivos coeficientes de determinação (R²)

Concentração de entrada (C ₀ ; mg L ⁻¹)	Equações ajustadas	R ²	EPE
2,5	$\hat{y} = \frac{87,450}{1+e^{-\left(\frac{x+5,383}{1,686}\right)}}$	0,99	0,198
4,5	$\hat{y} = \frac{87,815}{1+e^{-\left(\frac{x+7,618}{2,467}\right)}}$	0,98	0,356
9,0	$\hat{y} = \frac{89,168}{1+e^{-\left(\frac{x+5,319}{1,907}\right)}}$	0,99	0,084
13,5	$\hat{y} = \frac{89,883}{1+e^{-\left(\frac{x+7,903}{2,962}\right)}}$	0,99	0,364

Outros autores observaram uma variação na cor da castanha-do-Brasil, considerando-se luminosidade, saturação ou croma e tonalidade devido ao processo de ozonização (FREITAS-SILVA et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2020; FERREIRA et al., 2021; SILVA et al., 2022). Tais alterações podem estar relacionadas a oxidação de compostos da película marrom escura que caracteristicamente envolve a castanha. Essas alterações também foram observadas em grãos de amendoim por Alencar et al. (2011) e por Sanchez et al. (2016). Salienta-se que possivelmente essas alterações na cor não inviabilizam a aceitação e o consumo do produto. É importante que análise sensorial de castanha-do-Brasil ozonizada seja avaliada em trabalhos futuros.

CONCLUSÕES

A altura da coluna do produto influencia o tempo e a concentração de saturação, durante o processo de ozonização. O aumento da concentração de entrada do ozônio implica na redução do tempo de saturação, nas diferentes alturas de coluna da castanha-do-Brasil. A aplicação do ozônio nas condições adotadas não afeta a qualidade do produto de forma a inviabilizar a comercialização do produto, levando-se em consideração as variáveis relacionadas a cor e teor de ácidos graxos livres e índice de peróxido do óleo bruto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFSAH-HEJRI, LEILI; HAJEB, PARVANEH; EHSANI, REZA J. Application of ozone for degradation of mycotoxins in food: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 19, n. 4, p. 1777-1808, 2020.

ALENCAR, E.R.; FARONI, L.R.A; MARTINS, M.A.; COSTA, A.R.; CECON, P.R. Decomposition kinetics of gaseous ozone in peanuts. **Engenharia Agrícola**, v.31, n.5, p.930-939, 2011.

AOCS. **Official methods and recommended practices**. 4^a ed. Champaign: AOCS, 2v. 1993.

BLIGH, E.G.; DYER, W.J.A rapid method of total lipid extraction and purification. **Canadian journal of biochemistry and physiology**, v.37, n.8, p.911-917, 1959.

CARDOSO, B. R.; DUARTE, G. B. S.; REIS, B. Z.; COZZOLINO, S. M. Brazil nuts: Nutritional composition, health benefits and safety aspects. **Food Research International**, v. 100, p. 9-18, 2017.

CLESCERL, L.S.; GREENBERG, A.E.; EATON, A.D. Standard methods for the examination of water and wastewater. Denver: **Water Work Association**, p.1220, 2000.

FAO. (1999). **Codex standard for edible fats and oils not covered by individual standards**. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/004/y2774e/y2774e03.htm>>. Acesso em: 10 out. 2022.

FERREIRA, W. F. D. S.; DE ALENCAR, E. R.; BLUM, L. E. B.; FERREIRA, M. D. A.; MENDONÇA, M. A.; RACANICCI, A. M. C.; URRUCHI, W. M. I. Ozonation of Brazil nuts in aqueous media at different pH levels: ozone decomposition, aspergillus flavus inactivation, and effects on nut color and crude oil lipid profile. **Ozone: Science & Engineering**, v. 43, n. 4, p. 351-362, 2021.

FREITAS-SILVA, O.; MORALES-VALLE, H.; VENÂNCIO, A. Potential of aqueous ozone to control aflatoxigenic fungi in Brazil nuts. **International Scholarly Research Notices**, v. 2013, 2013.

GALLO, A.; SOLFRIZZO, M.; EPIFANI, F.; PANZARINI, G.; PERRONE, G. Effect of temperature and water activity on gene expression and aflatoxin biosynthesis in *Aspergillus flavus* on almond medium. **International journal of food microbiology**, v. 217, p. 162-169, 2016.

IBGE (Instituto Brasileiro De Geografia e Estatística). **Produção extrativa vegetal - Quantidade produzida na extração vegetal por tipo de produto extrativo**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/castanha-do-para/br>>. Acesso em: 02 out. 2020.

LIMA, L. W.; STONEHOUSE, G. C.; WALTERS, C.; MEHDAWI, A. F. E.; FAKRA, S. C.; PILON-SMITS, E. A. Selenium accumulation, speciation and localization in Brazil nuts (*Bertholletia excelsa* HBK). **Plants**, v. 8, n. 8, p. 289, 2019.

LUO, X.; WANG, R.; WANG, L.; LI, Y.; WANG, Y.; CHEN, Z. Detoxification of aflatoxin in corn flour by ozone. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 94, n. 11, p. 2253-2258, 2014.

MASKAN, M. Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. **Journal of Food Engineering**, v.48, p.169-175, 2001.

OLIVEIRA, J. M.; DE ALENCAR, E. R.; BLUM, L. E. B.; DE SOUZA FERREIRA, W. F.; BOTELHO, S. D. C. C.; RACANICCI, A. M. C.; DA SILVA, C. R. 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, 2020.

PANDISELVAM, R.; SUBHASHINI, S.; BANUU PRIYA, E. P.; KOTHAKOTA, A.; RAMESH, S. V.; SHAHIR, S. Ozone based food preservation: A promising green

technology for enhanced food safety. **Ozone: Science & Engineering**, v. 41, n. 1, p. 17-34, 2019.

ROBERTO, M. D. A.; ALENCAR, E. R. D.; FERREIRA, W. F. D. S.; MENDONÇA, M. A.; ALVES, H. Saturação do ozônio em coluna contendo grãos de amendoim e efeito na qualidade. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 19, 2016.

SANCHEZ, B.A.O.; ALENCAR, E.R.; PINELLI, L.L.O.; FERREIRA, W.F.S.; ROBERTO, M.A. Tracing interactions among column height, exposure time and gas concentration to dimension peanut antifungal ozonation. **LWT-Food Science and Technology**, v.64, n.1, p.668-675, 2016.

SILVA, M. V. A.; FARONI, L. R. A.; SOUSA, A. H.; PRATES, L. H. F.; ABREU, A. O. Kinetics of the ozone gas reaction in popcorn kernels. **Journal of Stored Products Research**, v. 83, p. 168-175, 2019.

SILVA, M. V. D. A.; FARONI, L. R. D. A.; DE ALENCAR, E. R.; DE SOUSA, A. H.; CECON, P. R.; NOGUEIRA, J. V. F.; MASON FILHO, V. Ozone Injection at Low Pressure: Decomposition Kinetics, Control of Sitophilus zeamais, and Popcorn Kernel Quality. **Ozone: Science & Engineering**, v. 44, n. 1, p. 66-78, 2022.

SOUZA, J. V. D. S.; ALENCAR, E. R. D.; JUNQUEIRA, A. M.; OLIVEIRA, G. P. D. Ozone saturation and decomposition kinetics in porous medium containing different hybrids of maize. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, p. 286-291, 2018.

SUJAYASREE, O. J.; CHAITANYA, A. K.; BHOITE, R.; PANDISELVAM, R.; KOTHAKOTA, A.; GAVAHIAN, M.; MOUSAVI KHANEGHAH, A. Ozone: An advanced oxidation technology to enhance sustainable food consumption through mycotoxin degradation. **Ozone: Science & Engineering**, v. 44, n. 1, p. 17-37, 2022.

UNECE (United Nations Economic Commission for Europe). Oilseeds -Determination of moisture and volatile matter content, **Standard**, p.12, 2000.

CAPÍTULO II

ANÁLISE ECONÔMICA DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE SISTEMA DE OZONIZAÇÃO DE CASTANHA-DO-BRASIL

ANÁLISE ECONÔMICA DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE SISTEMA DE OZONIZAÇÃO DE CASTANHA-DO-BRASIL

RESUMO

A castanha-do-Brasil é obtida principalmente por meio de práticas extrativistas e o emprego de um sistema tão tradicional muitas vezes resulta em problemas de contaminação, o que compromete a qualidade geral do produto e leva a depreciação comercial. Sabendo que as aflatoxinas apresentam preocupantes riscos para a saúde, a sua presença na castanha-do-Brasil destinada ao consumo humano só é tolerável abaixo de concentrações específicas que variam em cada país. A inativação de microrganismos patogênicos e causadores de deterioração para controle de contaminação de alimentos é fundamental para a indústria alimentícia. Um procedimento que vem se mostrando eficaz nesse sentido é a ozonização. Além dos aspectos técnicos, a viabilidade econômica da ozonização é muito importante. Diante do exposto, o objetivo desse estudo foi analisar a viabilidade econômica de sistemas de ozonização utilizando combinações com dois tipos de silo (inox e polipropileno) e dois geradores de oxigênio (central de gases e PSA), simulando 4 configurações que foram comparadas entre si por meio de uma análise econômica baseada no modelo de fluxo de caixa. Os índices valor presente líquido (VPL), tempo de retorno de capital (TRC) e taxa interna de retorno (TIR) foram aplicados durante as análises. Para a simulação foi considerado um período de ozonização de 24 h com uma vazão de oxigênio de 3 L min⁻¹ e a concentração do ozônio de 8,88 mg L⁻¹. Foram utilizadas 3 estimativas de perda do lote total no caso da não implantação da tecnologia nos valores de 1%, 2% e 5%. Os indicadores financeiros (TRC, VPL e TIR) encontrados nesse trabalho permitiram concluir que dos 12 cenários avaliados, 10 são rentáveis e viáveis. Quando o valor de perda é de 1% as configurações 1 e 3 (ambas compostas por central de gases), não são viáveis em 10 anos. A configuração que apresentou maior viabilidade e rentabilidade foi a composta por silo de polipropileno e gerador PSA (4). Por outro lado, a configuração menos rentável, mas ainda sim viável foi a composta por silo de inox e gerador com central de gases (1). **Palavras-chave:** *Análise econômica; Ozonização; Tempo de retorno de capital; Valor líquido presente; Taxa interna de retorno.*

ECONOMIC ANALYSIS OF DIFFERENT BRAZIL NUTS OZONIZATION SYSTEM CONFIGURATIONS

ABSTRACT

Brazil nuts are obtained mainly through extractive practices and the use of such a traditional system often results in contamination problems, which compromises the overall quality of the product and leads to commercial depreciation. Knowing that aflatoxins pose worrying health risks, their presence in Brazil nuts intended for human consumption is only tolerable below specific concentrations that vary in each country. The inactivation of pathogenic and spoilage-causing microorganisms to control food contamination is essential for the food industry. A procedure that has been proving to be effective in this regard is ozonation. In addition to the technical aspects, the economic viability of ozonation is very important. Given the above, the objective of this study was to analyze the economic viability of ozonation systems using combinations with two types of silo (stainless-steel and polypropylene) and two oxygen generators (central gas and PSA), simulating 4 configurations that were compared to each other through an economic analysis based on the cash flow model. Net present value (NPV), Payback Period (PP) and Internal rate of return (IRR) indices were applied during the analyses. For the simulation, an ozonation period of 24 h was considered with an oxygen flow rate of 3 L min^{-1} and an ozone concentration of 8.88 mg L^{-1} . 3 estimates of loss of the total batch were used in the case of non-implementation of the technology in the values of 1%, 2% and 5%. The financial indicators (PP, NPV and IRR) found in this work allowed us to conclude that of the 12 scenarios evaluated, 10 are profitable and viable. When the loss value is 1%, configurations 1 and 3 (both composed of a central gas) are not viable in 10 years. The configuration that showed the greatest viability and profitability was the one composed of a polypropylene silo and PSA generator (4). On the other hand, the least profitable configuration, but still viable, was the one made up of a stainless-steel silo and a generator with gas central (1).

Keywords: *Economic analysis; Ozonation; Payback Period; Net present value; Internal rate of return.*

INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, as empresas brasileiras dominaram o mercado de castanha-do-Brasil tanto que, em muitos idiomas, o produto ainda leva o nome do Brasil. No entanto, a partir de 2011, observou-se uma queda constante da comercialização, tendo em vista que empresas brasileiras foram responsáveis por apenas 39% desse mercado, enquanto empresas da Bolívia tiveram uma participação de 47%, sendo atualmente o maior exportador desse produto (FAO, 2021).

A castanha-do-Brasil é exportada do Brasil em duas formas, sendo com e sem casca. A exportação predominante é a castanha com casca, que até 2012 representava 77,32% do quantitativo exportado. Anteriormente, a exportação desse produto sem casca era comum. Em 1989, por exemplo, a castanha-do-Brasil sem casca correspondeu a 46,15% do volume exportado. Mas, atualmente, representa apenas 6,05% do total (SANTOS et al., 2019).

O mercado da castanha-do-Brasil passou por diversas transformações nas últimas décadas. Vários são os fatores envolvidos nesse processo de transformação, tais como: econômicos, ambientais, sociais, legais e de políticas públicas. Mas os resultados se refletem sobretudo no desempenho do mercado ao nível da produção e das exportações, que definem o rendimento dos países contidos nesta cadeia (SANTOS et al., 2019).

A castanha-do-Brasil é obtida principalmente por meio de práticas extrativistas (Brasil, 2017) e o emprego de um sistema tão tradicional muitas vezes resulta em problemas de contaminação. Isso compromete a qualidade do produto e leva a depreciação comercial. Com temperaturas variando entre 25 e 30°C e a umidade relativa do ar entre 97 a 99%, a região amazônica possui condições favoráveis ao crescimento de fungos (SANTOS et al, 2012), prejudicando ainda mais a produção de castanha-do-Brasil, que é tão afetada pelo fungo *Aspergillus*, que é o fungo produtor das aflatoxinas.

Sabe-se que as aflatoxinas possuem potencial carcinogênico e sua presença na castanha-do-Brasil destinada ao consumo humano só é tolerável abaixo de concentrações específicas que variam em cada país. A União Europeia estabeleceu limites de 10 e 5 ppb para aflatoxina total e aflatoxina B1, respectivamente (Comunidade Europeia, 2010). Nos Estados Unidos, o limite é de 20 ppb (FDA - Food

and Drug Administration, 2000), enquanto no Brasil o máximo aceitável é 10 ppb (Brasil, 2011). Lotes com níveis acima dos tolerados são rejeitados.

A inativação de microrganismos patogênicos e causadores de deterioração em alimentos é fundamental para a indústria alimentícia. Técnicas de sanitização desempenham um papel importante na consecução desses objetivos durante as etapas de produção, transporte e armazenamento (ASLAM et al., 2020). Um procedimento que vem se mostrando eficaz nesse sentido é a ozonização. O uso do gás ozônio é uma tecnologia eficiente no controle e degradação de micotoxinas, sendo um agente fungicida e desintoxicante, agindo na inativação de microrganismos potencialmente aflatoxigênicos em vários alimentos, incluindo castanha-do-Brasil (ALERCAR et al, 2012; FERREIRA et al, 2019; AFSAH-HEJRI et al, 2020; OLIVEIRA et al, 2020). Além de apresentar capacidade de degradar micotoxinas, inclusive aflatoxinas, o ozônio não deixa resíduos e não altera as características físicas e qualitativas dos alimentos (SUJAYASREE et al., 2022).

Além dos aspectos técnicos da ozonização, como determinar concentração e período de exposição adequados, analisar a viabilidade econômica desse processo nos diferentes produtos é fundamental. Apesar dos diversos relatos na literatura, que tratam do efeito do ozônio na conservação de alimentos, em especial na prevenção e controle de contaminação por micotoxinas, há somente um relato no qual foi avaliada a viabilidade econômica do ozônio em produtos agrícolas, como grãos, amêndoas ou nozes. Melo Pereira et al. (2008) avaliaram a viabilidade econômica do ozônio em milho. Os principais motivos para investimento em infraestrutura ou novas tecnologias são os lucros retidos. Um investimento só é lucrativo quando suas receitas são maiores que o capital investido e as despesas (MARQUEZAN et al., 2006). Este conceito pode ser aplicado a projetos de ozonização. Para isso, são necessárias análises econômicas considerando os riscos envolvidos nesse processo e buscando estratégias que minimizem falhas de investimento

Diante do exposto, o principal objetivo deste estudo foi analisar a viabilidade econômica de diferentes configurações de sistemas de ozonização para castanha-do-Brasil descascada, levando em consideração os índices de valor presente líquido (VPL), tempo de retorno de capital (TRC) e taxa interna de retorno (TIR).

MATERIAL E MÉTODOS

Para analisar a viabilidade econômica do sistema de ozonização de castanha-do-Brasil sem casca, definiram-se os seguintes itens e considerações/condições:

- i) massa de produto por tratamento – cinco toneladas, sendo ozonizadas 500 toneladas por ano;
- ii) funcionamento do sistema de ozonização – 24 h por dia;
- iii) perda de produto em decorrência da rejeição por contaminação por aflatoxinas equivalentes a 1%, 2% e 5%;
- iv) acondicionamento do produto em silo de aço inox 304 e chapa de 5 mm ou de polipropileno, com capacidade de cinco toneladas;
- v) ventilador de 5 cv de aço inox ou de polipropileno;
- vi) fontes de oxigênio para geração de ozônio - central de gases com 20 cilindros de oxigênio industrial em aço de 50 L ou um gerador de oxigênio PSA (*Pressure Swing Adsorption*);
- vii) gerador de ozônio de 100 g/h, sendo demandado 8,0 kg de ozônio, em 3,5 dias, para tratamento de cinco toneladas de castanha-do-Brasil sem casca;
- viii) painel elétrico.

As condições de ozonização foram estabelecidas, levando-se em consideração os resultados obtidos por Oliveira et al. (2020), para inativar *Aspergillus flavus* em castanha-do-Brasil. Definiram-se as seguintes configurações do sistema de ozonização, sendo:

- Configuração 1: silo de aço inox; um ventilador 5 cv; um gerador de ozônio 100 g/h; um painel elétrico; e uma central de gases com 20 cilindros de oxigênio industrial em aço de 50 L;
- Configuração 2: um silo de aço inox; um ventilador 5 cv; um gerador de ozônio 100 g/h; um painel elétrico e um gerador de oxigênio PSA;
- Configuração 3: um silo de polipropileno; um ventilador 5 cv; um gerador de ozônio 100 g/h; um painel elétrico e uma central de gases com 20 cilindros de oxigênio industrial em aço de 50 L;
- Configuração 4: um silo de polipropileno; um ventilador 5 cv; um gerador de ozônio 100 g/h; um painel elétrico e um gerador de oxigênio PSA.

A vida útil do projeto foi definida em 10 anos com base na vida útil média do gerador de ozônio, que irá funcionar 24 horas por dia. Para a simulação foi considerado período de ozonização de 24 h. Além disso, foi considerado tratamento de 500 toneladas por ano (100 lotes de 5 toneladas).

Na avaliação econômica foi utilizado o custo de implantação da tecnologia e utilização dos equipamentos e os indicadores tempo de retorno do capital (TRC), valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR). O valor do investimento foi calculado utilizando-se o custo de implantação dos equipamentos para cada configuração do sistema de ozonização, além do custo de manutenção e depreciação dos mesmos (Tabela 1).

Noronha (1987) definiu depreciação (Equação 1) como sendo reserva contábil destinada a geração de fundos fundamentais para a substituição do capital investido em bens produtivos de longa duração.

$$Dp = \left[\frac{B - F}{N} \right] \quad \text{Equação 1}$$

em que

Dp = valor da depreciação em qualquer ano, R\$;

B = valor depreciável durante os anos de vida útil do ativo, R\$;

F = valor final, R\$; e

N = vida útil, ano.

Na Tabela 1 são apresentados o preço, a vida útil e a depreciação anual equipamento considerado nas configurações do sistema de ozonização da castanha-do-Brasil. Os preços de cada equipamentos foram obtidos a partir de pesquisa junto aos fornecedores no mercado brasileiro.

Tabela 1. Preço, vida útil e depreciação anual dos diferentes equipamentos considerados nas configurações do sistema de ozonização da castanha-do-Brasil

EQUIPAMENTO/ITEM	PREÇO	VIDA ÚTIL	DEPRECIÇÃO ANUAL
Silo de aço inox (5 toneladas)	R\$ 84.000,00	30 anos	R\$ 2.520,00
Silo de polipropileno (5 toneladas)	R\$ 21.200,00	10 anos	R\$ 1.908,00
Ventilador de aço inox 5 cv	R\$ 15.000,00	20 anos	R\$ 675,00
Ventilador de polipropileno 5 cv	R\$ 8.200,00	10 anos	R\$ 738,00
Gerador de ozônio 100g/h	R\$ 100.000,00	10 anos	R\$ 4.500,00
Painel elétrico	R\$ 15.000,00	20 anos	R\$ 900,00
Central de gases com 20 cilindros	R\$ 70.000,00	20 anos	R\$ 3.150,00
Gerador de oxigênio PSA	R\$ 100.000,00	20 anos	R\$ 9.000,00

Um fluxo de caixa foi calculado para cada uma das configurações do sistema de ozonização, representando o saldo do valor das receitas e despesas do processo.

Nas despesas correntes foi levado em consideração o preço do kg da castanha-do-Brasil vendida em atacado, o preço da carga do cilindro de oxigênio, o custo com mão-de-obra para manuseio dos equipamentos, o gasto energético e gasto com manutenção dos equipamentos (Tabela 2), os valores foram obtidos a partir de pesquisas de mercado. Foram utilizadas 3 estimativas de perda do lote total no caso da não implantação da tecnologia nos valores de 1%, 2% e 5% para análise de diferentes cenários de perda, no caso de o lote ser descartado quando contaminado com aflatoxinas.

Tabela 2. Despesas correntes, custo mensal e custo anual

DESPESA	CUSTO MENSAL	CUSTO ANUAL
Preço Kg da castanha-do-Brasil	R\$ 58,00	R\$ 58.000,00
Carga de oxigênio	R\$ 200,00	R\$ 200.000,00
Funcionário (3 salários mínimos + encargos trabalhistas)	R\$ 6.363,00	R\$ 82.719,00
Energia elétrica (kWh = R\$ 0,70)	R\$ 817,60	R\$ 9.811,20
Manutenção do PSA	R\$ 333,33	R\$ 4.000,00
Manutenção do gerador de ozônio	R\$ 333,33	R\$ 4.000,00
Manutenção do ventilador	R\$ 83,33	R\$ 1.000,00
Manutenção do painel elétrico	R\$ 41,66	R\$ 500,00

Tendo como base os dados de renda (despesas e receitas), estabeleceram-se: o tempo de retorno de capital (TRC), o valor presente líquido (VPL) e a taxa interna de retorno (TIR) para cada configuração.

O Tempo de Retorno de Capital (TRC) (Equação 2) refere-se ao tempo necessário para recuperar o investimento inicial pelas receitas acumuladas. Este índice foi calculado aplicando-se a Equação 2 para cada ano de uso do sistema de ozonização até um valor maior que o investimento inicial foi encontrado (YARD et al., 2000).

$$\sum_{t=0}^n Lt = 0$$

Equação 2

em que:

L = fluxo líquido do projeto, R\$;

t = tempo, ano;

N = horizonte do projeto, ano; e

t = 0, 1, 2, ..., N sendo $N \geq n$

Em geral, $L_0 < 0$ e $L_t > 0$ para $t \geq 1$.

O Valor Presente Líquido (VPL) (Equação 3) corresponde à soma algébrica dos valores presentes que compõem o fluxo de caixa. Ou seja, é a soma das despesas de capital, despesas operacionais e receitas gerada pelo projeto, descontando a taxa de inflação para o momento inicial da vida útil do projeto (CARVALHO LOPES et al, 2013). A utilização do sistema de ozonização para castanha-do-Brasil só será lucrativa se o VPL for maior que zero.

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{L_t}{(1 + \rho)^t}$$

Equação 3

em que:

VPL = valor presente, R\$;

N = horizonte do projeto, ano;

L = fluxo líquido do projeto, R\$;

t = tempo, ano; e

ρ = taxa de desconto relevante para a empresa.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) (Equação 4) é o valor de “ ρ ” que torna o valor presente do fluxo líquido igual a zero, ou seja, esse índice representa a razão de retorno onde a soma das receitas é igual à soma das despesas (CARVALHO LOPES et al, 2013).

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{L_t}{(1 + \rho)^t} \quad \text{Equação 4}$$

em que:

N = horizonte de projeto, ano;

L = fluxo líquido do projeto, R\$;

t = tempo, ano; e

ρ = taxa interna de retorno (a ser calculada).

A partir da análise econômica, considerando-se as configurações do sistema de ozonização da castanha-do-Brasil, realizou-se comparação entre elas e analisou-se os principais fatores que afetaram sua viabilidade econômica. Todos os cálculos e análises foram realizados usando planilhas eletrônicas no Excel.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3, são apresentados os valores de tempo de retorno de capital, valor presente líquido e taxa interna de retorno de diferentes configurações do sistema de ozonização da castanha-do-Brasil, considerando-se taxas de perda de 1%, 2% e 5%.

Tabela 3. Valores de tempo de retorno de capital, valor presente líquido e taxa interna de retorno de cada configuração com taxas de perda estipuladas em 1%, 2% e 5%

Configurações	TRC	VPL	TIR
1% de perda			
1	75 anos	- R\$ 387.781,00	<0
2	2,34 anos	R\$ 548.617,00	33%
3	12,93 anos	-R\$ 315.439,00	<0
4	1,75 anos	R\$ 624.330,00	46,6%
2% de perda			
1	1,28 anos	R\$ 1.060.754,00	66,9%
2	0,79 anos	R\$ 1.997.152,00	111,4%
3	0,93 anos	R\$ 1.133.096,00	92,0%
4	0,62 anos	R\$ 2.072.866,00	145,9%
5% de perda			
1	0,29 anos	R\$ 5.406.360,00	324,0%
2	0,27 anos	R\$ 6.342.758,00	344,7%
3	0,22 anos	R\$ 5.478.702,00	428,8%
4	0,21 anos	R\$ 6.418.472,00	443,0%

Analisando-se o balanço de despesas e receitas ao longo dos 10 anos e para os diferentes percentuais de perda do produto (Tabela 3), é possível observar que o investimento em sistema de ozonização para castanha-do-Brasil sem casca é viável nas diferentes configurações, exceto nas configurações 1 e 3, quando se considerou 1% de perda do produto. Nas configurações 1 e 3, obtiveram-se TRC iguais a 75 anos e 12,93 anos, respectivamente, e VPL e TRI menor que zero. Por outro lado, para percentual de perda de 1%, as configurações 2 e 4 foram viáveis, com TCR de 2,34 anos e 1,75 anos, respectivamente. No que se refere a VPL para as configurações 2 e 4, obtiveram-se valores de R\$ 548.617,00 e R\$ 624.330,00, respectivamente, e TRI maior que zero.

No que tange aos percentuais de perda de 2% e 5%, verificou-se que todas as configurações foram viáveis economicamente. Entretanto, a adoção das configurações 2 e 4 se apresentaram mais vantajosas, levando-se em consideração os valores estimados de TRC, VPL e TIR. Quando se adotou 2% de perda, a

configuração 1 apresentou valores de TRC, VPL e TIR iguais a 1,28 anos, R\$ 1.060.754,00 e 66,9%. Em contrapartida, estimaram-se em 0,62 anos, R\$ 2.072.866,00 e 145,9% TRC, VPL e TIR, respectivamente, para a configuração 4. Quando se considerou 5% de perda, estiveram-se TRC entre 0,27 anos e 0,21 anos, VPL entre R\$ 5.406.360,00 e R\$ 6.418.472,00 e TIR entre 324,0% e 443,0%.

A inviabilidade econômica das configurações 1 e 3, no cenário com 1% de perda de castanha-do-Brasil, pode ser justificada pela instalação de central de gases com 20 cilindros de oxigênio industrial de aço de 50 litros. Tem-se ainda o custo de recarga anual de oxigênio, contribuindo para a não rentabilidade das configurações. Ao contrário da central de gases, o gerador de oxigênio PSA apresenta o custo de aquisição, além da manutenção. Por isso, mesmo sendo um equipamento relativamente caro (R\$ 100.000,00), ele não possui despesas extras além da manutenção anual.

No gerador PSA (*Pressure Swing Adsorption*), o ar é forçado a passar por recipiente de alta pressão contendo um leito adsorvente de zeólita (alumínio-silicatos de metais alcalinos), que adsorve nitrogênio com mais força do que o oxigênio. O leito adsorvente é capaz de reter uma parte ou todo o nitrogênio. Como resultado, o gás que sai do recipiente é mais rico em oxigênio (ZHU et al., 2017). A implementação de um sistema PSA para disponibilizar oxigênio tem grandes benefícios em relação ao custo. Além disso, o sistema PSA proporciona a obtenção de um oxigênio de melhor qualidade, com uma concentração de 90 a 96% (ZHU et al., 2017).

Além da diferença de configuração relacionada ao gerador de oxigênio, outro fator que diferencia as configurações é o tipo de silo, sendo as configurações 1 e 2 compostas por silo de aço inox 304 e chapa de 5 mm, já as configurações 3 e 4 são compostas por silo de polipropileno. O silo de aço inox apresenta custo de aquisição inicial mais elevado (R\$ 84.000,00) em relação ao silo de polipropileno (R\$ 21.200,00). Por outro lado, a vida útil considerada para o silo de aço inox é maior (30 anos), em comparação com ao silo de polipropileno (10 anos). Dessa forma, pode-se inferir que o tipo de silo não é fator determinante para a escolha da configuração, podendo ser feita de acordo com a preferência do produtor.

Analisando-se cada variável econômica individualmente, observou-se que a TRC é menor que 1 ano em quase todas as configurações, demonstrando-se que a

adoção de sistema de ozonização é importante alternativa para o produtor de castanha-do-Brasil que possui perda entre 2% a 5% de seu produto, tendo em vista que o investimento vai ser baixo e o retorno vai ser rápido. Como observado por diversos autores (FERREIRA et al, 2019; AFSAH-HEJRI et al, 2020; OLIVEIRA et al, 2020), ao ozonizar, o produtor reduzirá o risco de contaminação do produto com aflatoxinas durante o armazenamento. Dessa forma, será possível atender os requisitos impostos pelos países importadores, no que se refere aos limites mínimos de aflatoxinas e conseguir exportar seu produto reduzindo o risco de rejeição.

Quando o produtor tem uma perda de até 1% a configuração mais vantajosa é a 4, que apresenta um TRC de 1,75 anos. A configuração 4 é composta por um silo de polipropileno e um gerador de oxigênio PSA. As configurações 1 e 3 não são viáveis para percentual de perda de 1%, com um tempo de retorno de capital maior que 10 anos. Quando o produtor possui uma taxa de perda entre 2-5%, os resultados indicam a configuração 4 como a mais rentável, com um TRC de 0,62 anos, para de 2% de perda, e 0,21 anos quando a perda é de 5%. As demais configurações também são viáveis e apresentam um TRC menor que 1 ano, demonstrando-se que qualquer uma das configurações escolhidas pelo produtor apresentam viabilidade econômica em um curto prazo de tempo. A configuração 1 é a que apresenta um maior TRC nos cenários com 2% e 5% de perdas, de 1,28 anos e 0,29 anos, respectivamente.

A viabilidade econômica da utilização de ozônio pelo método do Valor Presente Líquido (VPL) é indicada pela diferença positiva entre receitas e despesas, atualizados de acordo com a taxa de juros de 13,75% ao ano (BACEN, 2023). Observou-se que o VPL foi maior que 0 em todas as configurações, exceto para as configurações 1 e 3, quando levada em consideração perda de 1%. Ainda com a perda de 1%, a configuração que apresenta o maior VPL é a 4 (silo de polipropileno e gerador PSA), comprovando mais uma vez que a configuração 4 é a mais vantajosa para o produtor, que se encaixa na categoria de até 1% de perda.

Na análise de implantação de uma tecnologia, independentemente das configurações, o critério de decisão consiste em aceitá-lo se $VPL \geq 0$ (NORONHA, 1987). Dessa forma, pode-se inferir que a implementação de qualquer uma das quatro configurações de sistema de ozonização é viável, quando se tem perda entre 2 e 5%. As configurações 2 e 4 são viáveis quando se tem perda de 1%. Sendo a configuração

4 a que apresenta maior rentabilidade em menos tempo nos três cenários de perda do produto.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) de um projeto é a taxa de desconto que iguala o valor atual das receitas futuras ao valor atual dos custos futuros do projeto, ou seja, é a taxa média de crescimento de um investimento (TSUKAMOTO FILHO et al., 2003). Quando a TIR é maior que zero, indica-se que as receitas descontadas são maiores que as despesas descontadas.

A análise da TIR foi igual aos outros parâmetros, em que as quatro configurações de sistema de ozonização apresentaram uma $TIR > 0$, quando se tem perda entre 2 e 5%. As configurações 2 e 4 apresentam $TIR > 0$, quando se tem perda de 1%. Novamente a configuração 4 (silo de polipropileno e gerador PSA) foi a mais rentável apresentando taxas de 46,6%, 145,9% e 443,0%, quando levando em consideração as perdas de 1, 2 e 5%, respectivamente. Já a configuração 1 (silo de aço inox e central de gases) foi a que apresentou as menores taxas de retorno (66,9 e 324%), no contexto de perda de 2 e 5%.

O ozônio possui várias aplicabilidades na indústria como tratamento de água potável e esgoto, na aquicultura, em equipamentos médicos, em processamento têxtil e na indústria alimentícia (EPELLE et al., 2023). Estudos comprovaram que o caráter fortemente oxidante e não seletivo do ozônio lhe confere expressiva eficácia contra diferentes grupos de microrganismos. Ressalta-se ainda que na maioria dos casos, o ozônio não altera a composição nutricional dos alimentos e que não são formados metabólitos prejudiciais à saúde humana e animal com a sua degradação (KIM et al., 2003). Além disso, é considerada uma tecnologia verde de conservação e garantia da segurança dos alimentos (PANDISELVAM et al., 2019), o que pode contribuir com a aceitação do produto ozonizado no mercado internacional.

Nesse trabalho, foi comprovada a viabilidade econômica de sistema de ozonização de castanha-do-Brasil sem casca, com diferentes configurações e levando-se em consideração cenários de perda de 1%, 2% e 5%. Das 12 diferentes combinações analisadas, o sistema de ozonização se mostrou viável economicamente em 10 combinações. A ozonização se mostrou uma tecnologia que necessita de baixo investimento e possui um rápido tempo de retorno de capital e uma

alta rentabilidade. Nesse contexto, pode-se afirmar que a ozonização poderá ser utilizada pelo setor que processa castanha-do-Brasil.

CONCLUSÕES

Os indicadores financeiros (TRC, VPL e TIR) encontrados nesse trabalho permitem concluir que o investimento é viável em 10 dos 12 cenários considerados. Todas as configurações são viáveis quando os valores de perda são de 2% e 5%. Quando o percentual de perda é de 1%, somente as configurações 2 (silo de inox e gerador PSA) e 4 (silo de polipropileno e gerador PSA) são viáveis em 10 anos. A configuração que apresentou maior viabilidade e rentabilidade foi a 4 (silo de polipropileno e gerador PSA) nos três cenários de perda do produto (1%, 2% e 5%). A escolha do silo não interfere na viabilidade do investimento. Por outro lado, a escolha da fonte de oxigênio interfere, tendo-se o gerador PSA como a melhor opção. A instalação de um sistema de ozonização para controle de fungos em castanha-do-Brasil sem casca pela indústria é viável economicamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFSAH-HEJRI, LEILI; HAJEB, PARVANEH; EHSANI, REZA J. Application of ozone for degradation of mycotoxins in food: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 19, n. 4, p. 1777-1808, 2020.

ALENCAR, E.R.; FARONI, L.R.D.; SOARES, N.F.F.; SILVA, W.A.; CARVALHO, M.C.S. Efficacy of ozone as a fungicidal and detoxifying agent of aflatoxins in peanuts. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.92, p.899-905, 2012.

ASLAM, R.; ALAM, M. S.; SAEED, P. A. Sanitization potential of ozone and its role in postharvest quality management of fruits and vegetables. **Food engineering reviews**, v. 12, p. 48-67, 2020.

BACEN (2023). **Taxa de juros básicas – Histórico**. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>>. Acesso em 14 jun. 2023.

BRASIL (2011). **Resolução De Diretoria Colegiada – RDC Nº 07, de 18 de fevereiro de 2011. Dispõe Sobre Limites Máximos Tolerados (LMT) Para Micotoxinas Em Alimentos**. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2968262/RDC_07_2011_COMP.pdf/afe3f054-bc99-4e27-85c4-780b92e2b966>. Acesso em: 02 out. 2020.

BRASIL (2017). **Castanha-do-Brasil: Boas Práticas Para O Extrativismo Sustentável Orgânico**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/organicos/arquivospublicacoesorganicos/boas_praticas_de_manejo_para_o_extrativismo_sustentavel_organico_da_castanha_do_brasil.pdf>. Acesso em: 02 out. 2020.

CARVALHO LOPES, D.; NETO, A. J. S.; MENDES, A. A; PEREIRA, D. T. V. Economic feasibility of biodiesel production from Macauba in Brazil. **Energy Economics**, v. 40, p. 819-824, 2013.

CEPPI (2020). **BACI HS92**. Disponível em: <http://www.cepii.fr/CEPII/en/bdd_modele/bdd_modele_item.asp?id=37>. Acesso em: 02 out. 2020.

COMUNIDADE EUROPEIA (2010). **REGULAMENTOS. Regulamento (UE) N.º 165/2010 da Comissão de 26 de fevereiro de 2010 que altera o Regulamento (CE) N.º 1881/2006, que fixa os teores máximos de certos contaminantes presentes nos géneros alimentícios, no que diz respeito às aflatoxinas**. Disponível em: <<https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:050:0008:0012:PT:PDF>>. Acesso em: 02 out. 2020.

DOS SANTOS, M. A. S.; YARED, J. A. G.; DE SANTANA, A. C.; REBELLO, F. K.; BEZERRA, A. S. Production Evolution and Export Performance of Brazil Nut in The Brazilian Amazon. **International Journal of Food and Agricultural Economics (IJFAEC)**, v. 7, n. 1128-2019-3385, p. 215-228, 2019.

EPELLE, E. I.; MACFARLANE, A.; CUSACK, M.; BURNS, A.; OKOLIE, J. A.; MACKAY, W.; YASEEN, M. Ozone application in different industries: A review of recent developments. **Chemical Engineering Journal**, v. 454, p. 140188, 2023.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (2021). **Statistical database**. Disponível em: <www.fao.org>. Acesso em: 02 out. de 2021.

FDA FOOD AND DRUG ADMINISTRATION (2000). **Guidance for Industry: Action Levels for Poisonous or Deleterious Substances in Human Food and Animal Feed**. Disponível em: <<https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidancedocuments/guidance-industry-action-levels-poisonous-ordeleterious-substances-human-food-and-animal-feed>>. Acesso em: 02 out. 2020.

FERREIRA, W. F. D. S.; DE ALENCAR, E. R.; BLUM, L. E. B.; FERREIRA, M. D. A.; MENDONCA, M. A.; RACANICCI, A. M. C.; URRUCHI, W. M. I. Ozonation of Brazil

nuts in aqueous media at different ph levels: ozone decomposition, aspergillus flavus inactivation, and effects on nut color and crude oil lipid profile. **Ozone: Science & Engineering**, v. 43, n. 4, p. 351-362, 2021.

KIM, J.G.; YOUSEF, A.E.; KHADRE, M.A. Ozone and its current and future application in the food industry. In: TAYLOR, S.L. (Ed.) **Advances in Food and Nutrition Research**. New York: Academic Press, v.45, p.167-218, 2003.

NORONHA, J.F. Projetos agropecuários: administração financeira, orçamento e viabilidade econômica. 2.ed. São Paulo: **Atlas**, 269p, 1987.

OLIVEIRA, J. M.; DE ALENCAR, E. R.; BLUM, L. E. B.; DE SOUZA FERREIRA, W. F.; BOTELHO, S. D. C. C.; RACANICCI, A. M. C.; DA SILVA, C. R. 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, 2020.

PANDISELVAM, R.; SUBHASHINI, S.; BANUU PRIYA, E. P.; KOTHAKOTA, A.; RAMESH, S. V.; SHAHIR, S. Ozone based food preservation: A promising green technology for enhanced food safety. **Ozone: Science & Engineering**, v. 41, n. 1, p. 17-34, 2019.

MELO PEREIRA, A.; FARONI, L. R. D. A.; SILVA JÚNIOR, A. G. D.; SOUSA, A. H. D.; PAES, J. L. Viabilidade econômica do gás ozônio como fumigante em grãos de milho armazenados. **Revista Engenharia na Agricultura-REVENG**, v. 16, n. 2, 2008.

SANTOS, O. V. D.; CORRÊA, N. C. F.; SOARES, F. A. S. D. M.; GIOIELLI, L. A.; COSTA, C. E. F.; LANNES, S. C. S. Chemical evaluation and thermal behavior of Brazil nut oil obtained by different extraction processes. **Food Research International**, v. 47, n. 2, p. 253-258, 2012.

SUJAYASREE, O. J.; CHAITANYA, A. K.; BHOITE, R.; PANDISELVAM, R.; KOTHAKOTA, A.; GAVAHIAN, M.; MOUSAVI KHANEGHAH, A. Ozone: An advanced oxidation technology to enhance sustainable food consumption through mycotoxin degradation. **Ozone: Science & Engineering**, v. 44, n. 1, p. 17-37, 2022.

TSUKAMOTO FILHO, A.A.; SILVA, M.L.; COUTO L.; MULLER, M.D. Análise econômica de um plantio de teca a desbastes. **Revista Árvore**, v.27, n.4, p.487- 494, 2003.

YARD, S. Developments of the payback method. **International journal of production economics**, v. 67, n. 2, p. 155-167, 2000.

ZHU, X.; LIU, Y.; YANG, X.; LIU, W. Study of a novel rapid vacuum pressure swing adsorption process with intermediate gas pressurization for producing oxygen. **Adsorption**, v. 23, p. 175-184, 2017.

ANEXO

Ozonation of Brazil nuts (*Bertholletia excelsa* H.B.K.): effect of column height on the saturation process and changes in quality

Ozonização de castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K.): efeito da altura da coluna no processo de saturação e alterações na qualidade

Juliana Martins de Oliveira¹; Ernandes Rodrigues de Alencar^{2*};
Marcio Antonio Mendonça³

Highlights

Column height influences the ozone saturation process.

Increasing ozone concentrations reduced saturation time at different column heights.

Ozone did not change product quality to the point of rendering it unmarketable.

Abstract

The objective of this study is to examine the saturation process in a column containing Brazil nuts and possible changes in the quality of the product. Brazil nut samples were initially placed in a cylindrical PVC column 15 cm in diameter and 110 cm in height. The ozone gas concentrations of 2.5, 4.5, 9.0, and 14.0 mg L⁻¹ and a flow rate of 3.0 L min⁻¹ were applied at a temperature of 25 °C. Ozone gas was injected at the base of the cylindrical column, and the seed column height values adopted were 0.25, 0.50, and 0.75 m. Saturation concentration and time were determined. To measure possible changes in the quality of ozonized Brazil nuts, moisture and color, as well as qualitative variables of the crude oil were evaluated at the exposure times of 0, 3, 6, 9, and 12 h. To evaluate the quality of the crude oil extracted from ozonized nuts, the free fatty acid content, peroxide value, and iodine value were analyzed. Increasing ozonation times increased ozone concentration at all inlet gas concentrations. Saturation time decreased as the inlet gas concentration was increased, at the different product column heights. There was no change in product moisture in response to ozonation. Ozonation did not induce significant changes in color or in the crude oil, due to the triple interaction between column height, ozone concentration, and exposure time. In conclusion, the height of the product's column influences saturation time and concentration during the ozonation process. Considering the color of the product and characteristics of its crude oil, the use of

¹ Doctoral Student of the Postgraduate Program in Agronomy, Faculty of Agronomy and Veterinary Medicine, Universidade de Brasília, UnB, Brasília, DF, Brazil. E-mail: moliveira.juliana@gmail.com

² Prof. Dr., Agricultural Engineering Department, Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, MG, Brazil. E-mail: ernandes.alencar@ufv.br

³ Prof. Dr., Faculty of Agronomy and Veterinary Medicine, UnB, Brasília, DF, Brazil. E-mail: mendonca@unb.br

* Author for correspondence

ozone under the conditions adopted in the present study does not affect the quality of Brazil nuts to the point of rendering them unmarketable.

Key words: Ozone. Saturation time. Saturation concentration. Color. Crude oil.

Resumo

O objetivo do presente trabalho é estudar o processo de saturação em coluna contendo castanha-do-Brasil e possíveis alterações na qualidade do produto. Inicialmente as amostras de castanha-do-Brasil foram acondicionadas em coluna cilíndrica de PVC de 15 cm de diâmetro e 110 cm de altura. Foram adotadas as concentrações do gás ozônio de 2,5, 4,5, 9,0 e 14,0 mg L⁻¹ e vazão de 3,0 L min⁻¹, na temperatura de 25 °C. O gás ozônio foi injetado na base da coluna cilíndrica e os valores adotados de altura da coluna de grãos foram de 0,25, 0,50, e 0,75 m. Determinaram-se o tempo e a concentração de saturação. Na avaliação de possíveis alterações na qualidade de castanhas-do-Brasil ozonizadas foram determinados a umidade, coloração e variáveis qualitativas do óleo bruto, com tempos de exposição de 0, 3, 6, 9 e 12 h. Para avaliação da qualidade do óleo bruto extraído de castanhas ozonizadas foram analisadas o teor de ácidos graxos livres, o índice de peróxido e o índice de iodo. A elevação do período de ozonização promoveu aumento da concentração do ozônio para todas as concentrações de entrada do gás. No que se refere aos valores de tempo de saturação, à medida que se elevou a concentração de entrada do gás, houve redução do tempo de saturação, nas diferentes alturas de coluna do produto. Não houve variação da umidade do produto em decorrência da ozonização. A ozonização não provocou alterações significativas na cor e no óleo bruto, em decorrência da interação tripla entre altura da coluna do produto, concentração do ozônio e tempo de exposição. É possível concluir que a altura da coluna do produto influencia o tempo e a concentração de saturação, durante o processo de ozonização. O uso do ozônio nas condições adotadas no presente estudo não afeta a qualidade da castanha-do-Brasil, considerando-se a cor do produto e características do óleo bruto, de tal forma a inviabilizar a comercialização.

Palavras-chave: Ozônio. Tempo de saturação. Concentração de saturação. Coloração. Óleo bruto.

Introduction

The Brazil nut is a monotypic tree of the genus *Bertholletia*, family Lecythidaceae, that is native to the Amazon region. Its only species, *B. excelsa*, produces large, oil-rich seeds of biological and nutritional interest due to their high concentrations of selenium and other minerals (Lima et al., 2019).

Brazil nuts are the second most profitable extractive product from the Amazon region, only after açaí, with a production of 33,118 t (Instituto Brasileiro

De Geografia e Estatística [IBGE], 2020). This product possesses high nutritional value and health benefits, making it a valuable export commodity (Cardoso et al., 2017). However, one of the main concerns related to the safety of Brazil nuts is contamination with aflatoxigenic fungi (Gallo et al., 2016). Aflatoxins induce high toxicity, both acute and chronic, and can cause cancer, with the liver being the most affected organ (Afsah-Hejri et al., 2020).

As the food industry grows and becomes increasingly competitive, it is

important to develop top-quality products that are ready to be consumed with safety. One of the current focuses of research is the application of ozone, a non-thermal, residue-free technology capable of degrading mycotoxins in food (Sujayasree et al., 2022).

Thanks to its high oxidative potential, and mainly when used at high concentrations, ozone is able to generate radicals, affecting the structure of mycotoxin molecules. This can lead to changes in these substances, forming products of lower molecular weight and reduced toxicity, which implies detoxification of contaminated foods (Pandiselvam et al., 2019).

Because ozone is highly reactive when in contact with organic materials, a kinetic evaluation of the decomposition of the gas in a medium containing different plant products is required to determine parameters such as saturation concentration and time, as well as possible changes in product quality. Several studies can be found in the literature evaluating the ozone saturation process, but only one report addresses the saturation process in Brazil nuts (Oliveira et al., 2020). In said study, the authors used samples of 1.0 kg, thus not considering the product's column height, an essential variable for the application of the ozonation process.

In view of the above descriptions, this study was undertaken to evaluate the process of ozonation of Brazil nuts considering different combinations of inlet gas concentrations and product column heights, as well as to investigate possible changes in product color and in the quality of the crude oil.

Material and Methods

The study was carried out at the Agricultural Product Pre-Processing and Storage and Food Analysis laboratories at the Faculty of Agriculture and Veterinary Medicine (FAV), University of Brasília (UnB).

Generation of ozone gas

Ozone gas was obtained using an ozone generator based on the Dielectric Barrier Discharge method. In the ozone generation process, oxygen (O_2) was used as inlet gas, with a purity of approximately 90% and free of moisture, which was obtained from an oxygen concentrator attached to the ozone generator.

Ozone saturation process in a column containing Brazil nuts

Initially, the Brazil nut samples were placed in a cylindrical PVC column 15 cm in diameter and 110 cm in height (Figure 1). To support the samples, a 1.4-mm-thick metal plate with 22.6% perforated area and 5.0-mm-diameter holes was installed at the base of the cylindrical column. The ozone gas concentrations of 2.5, 4.5, 9.0, and 14.0 $mg\ L^{-1}$ and flow rate of 3.0 $L\ min^{-1}$ were used at a temperature of 25 °C. These ozone concentrations were applied considering the study developed by Oliveira et al. (2020), who analyzed the effect of ozone on *Aspergillus flavus* and on the quality of Brazil nut. Ozone gas was injected at the base of the cylindrical column and the seed column heights adopted were 0.25, 0.50, and 0.75 m (Figure 1). The residual concentration of ozone was

determined after the passage of the gas through the cylindrical column containing Brazil nuts, adopting different seed column heights. Initially, the ozone saturation process was evaluated by quantifying the residual concentration, by the iodometric method, until it became constant. A thermal catalyst was used to degrade the residual ozone (Figure 1).

The ozone concentration was determined before and after the gas was passed through the product column by the iodometric method, described by Clescerl et al. (2000), by bubbling the gas containing ozone in 50 mL of 1N potassium iodide (KI) solution, producing iodine (I_2). To ensure that the reaction shifted towards the production of I_2 , the solution was acidified with 2.5 mL of 1 N sulfuric acid (H_2SO_4), followed by titration with 0.01 N sodium thiosulphate ($Na_2S_2O_3$). A 1% starch solution was used as an indicator.

To relate the residual concentration of ozone gas with time, a sigmoidal equation was fitted to the obtained data (Equation 1):

$$C = \left[\frac{a}{1 + e^{-(t-b)/c}} \right] \quad \text{Equation 1}$$

in which C = ozone gas concentration ($mg\ L^{-1}$); t = time (min); a , b , and c = constants of the equation.

Constants b and c were used to determine the saturation time for each inlet gas concentration (Equation 2) and, subsequently, to obtain the saturation concentration:

$$t_{Sat} = b + 2c \quad \text{Equation 2}$$

in which t_{Sat} = saturation time (min).

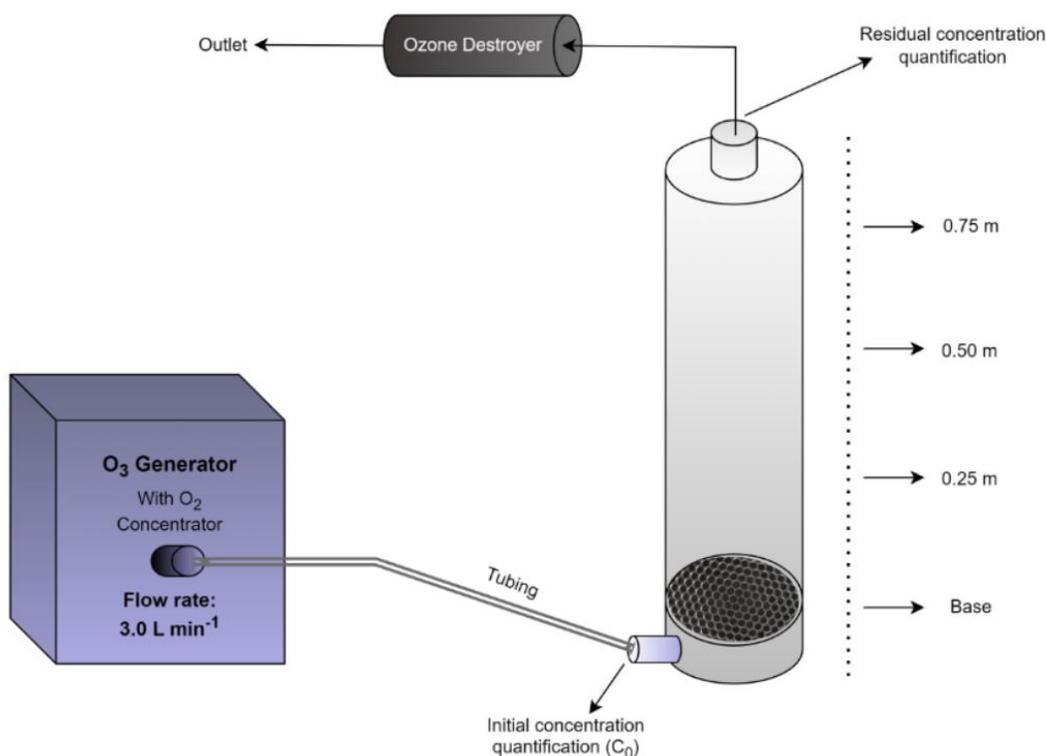


Figure 1. Experimental scheme for the ozonation of Brazil nuts.

Qualitative analyses of ozonized Brazil nuts

This step was performed using the inlet concentrations of 2.5, 4.5, 9.0, and 14.0 mg L⁻¹ and flow rate of 3.0 L min⁻¹, at a temperature of 25 °C. The ozonation periods were 0 (non-ozonized), 3, 6, 9, and 12 h, and the maximum product column height was 0.75 m. Samples of 80 g of Brazil nuts were previously packed in organza bags and placed at 0, 0.25, 0.50, and 0.75 m in the cylindrical column (Figure 1). Three replications were used for each combination between ozone concentration, product column height, and exposure period. To assess possible alterations in the quality of ozonized Brazil nuts, moisture and color as well as qualitative variables of the crude oil were evaluated. To evaluate the quality of the crude oil extracted from ozonized nuts, the free fatty acid content and peroxide value were analyzed.

The moisture of the Brazil nuts was determined by drying in a forced-air oven at a temperature of 103±2 °C to constant weight, according to ISO 665-2000 (United Nations Economic Commission for Europe [UNECE], 2000).

The color of the nuts was evaluated using the Colorquest XE spectrophotometer (HunterLab, Reston, United States), which defined the values of coordinates L* (lightness, measurement of intensity from black to white), a* (measurement of intensity from green to red), and b* (measurement of intensity from blue to yellow) of the Hunter system. Based on the a* and b* coordinates, it was possible to obtain the hue angle (h*) (Equation 1) and the saturation color or chroma C* (Equation 2) (Maskan, 2001).

$$h^* = \arctan (b^*/a^*) \quad (1)$$

$$C^* = \sqrt{(a^*{}^2 + b^*{}^2)} \quad (2)$$

Lipid extraction for analysis of free fatty acid (FFA) content and peroxide value (PV) was performed by the method of Bligh and Dyer (1959). An aliquot of 2.5 g of ground samples was weighed and transferred to a 50-mL Falcon tube, to which 5.0 mL of chloroform, 10.0 mL of methanol, and 4.0 mL of distilled water were added. The mixture was homogenized on a rotary shaker for 30 min. An additional 5 mL of chloroform and 5 mL of 1.5% sodium sulfate solution were added. A new agitation was performed for 2 min, followed by centrifugation at 1,000 rpm for 2 min. Then, the upper methanol layer was pipetted and discarded. Next, the lower layer was collected and placed in a 50-mL tube. The sample collected in the lower layer was filtered through a funnel with qualitative filter paper. The filtrate was then collected in a 50-mL beaker, which was subsequently taken to an oven at 40 °C for the evaporation of residual chloroform. This procedure was repeated eight times per replication, so it was possible to obtain sufficient oil mass for the analyses of quality.

The FFA content was determined according to American Oil Chemists Society [AOCS] (1993) Method Ca 5a-40, and expressed as a percentage of oleic acid. The peroxide value was determined as per AOCS (1993) Method Cd 8-53, with results expressed in mEq kg⁻¹.

Experimental design

The experiment was laid out in a completely randomized design with three replications. For the saturation step, the experiment was carried out in a 4×4 factorial arrangement with four gas concentrations (2.5, 4.5, 9.0, and 13.5 mg L^{-1}) and four heights (0, 0.25, 0.50, and 0.75 m). To evaluate the effect on quality, a $4 \times 4 \times 5$ factorial arrangement was adopted, which corresponded to four concentrations (2.5, 4.5, 9.0, and 13.5 mg L^{-1}), four heights (0, 0.25, 0.50, and 0.75 m), and five ozonation periods (0, 3, 6, 9, and 12 h). Analysis of variance was performed at 5% probability, followed by Tukey's test or regression analysis. StatPlus v.5 software (AnalystSoft Inc, Canada) was used for analysis of variance and Tukey's test, whereas SigmaPlot v.10 software (Systat Software Inc, Germany) was employed to obtain the regression equations and plot the graphs.

Results and Discussion

Ozone saturation process in a column containing Brazil nuts

Figure 2 illustrates the residual ozone concentration in Brazil nuts in different combinations of column heights (0, 0.25, 0.50, and 0.75 m) and inlet gas concentrations (2.5, 4.5, 9.0, and 13.5 mg L^{-1}). Based on the results observed during the saturation process,

increasing ozonation times increased ozone concentration for all inlet gas concentrations. These results corroborate other studies (Roberto et al., 2016; Souza et al., 2018; Silva et al., 2019; Oliveira et al., 2020). The ozone transported through the seed mass is very reactive and acts in two steps. In principle, the gas reacts with active sites on the surface of the product, accelerating its degradation. Then, as the ozone moves through the seed mass, more active sites react with the gas, and the rate of degradation slows.

There was a significant effect of inlet gas concentration on saturation time, which was obtained from the equations described in Table 1. Overall, as the inlet gas concentration (C_0) was increased, saturation time decreased, at the different product column heights. An exception to this trend was observed at the column height of 0.25 m, in which the ozone concentration of 2.5 mg L^{-1} resulted in a saturation time of 59.5 min. On the other hand, when the gas concentration of 4.5 mg L^{-1} was used, saturation time was 65.1 min. The greatest difference between saturation times was found when comparing the values obtained for the concentrations of 2.5 mg L^{-1} (65.5 min) and 13.5 mg L^{-1} (26.5 min), when the product column height of 0.50 m was adopted. Saturation concentration (C_{Sat}) increased as the inlet gas concentration increased, and this trend was more pronounced at the product height of 0.50 m.

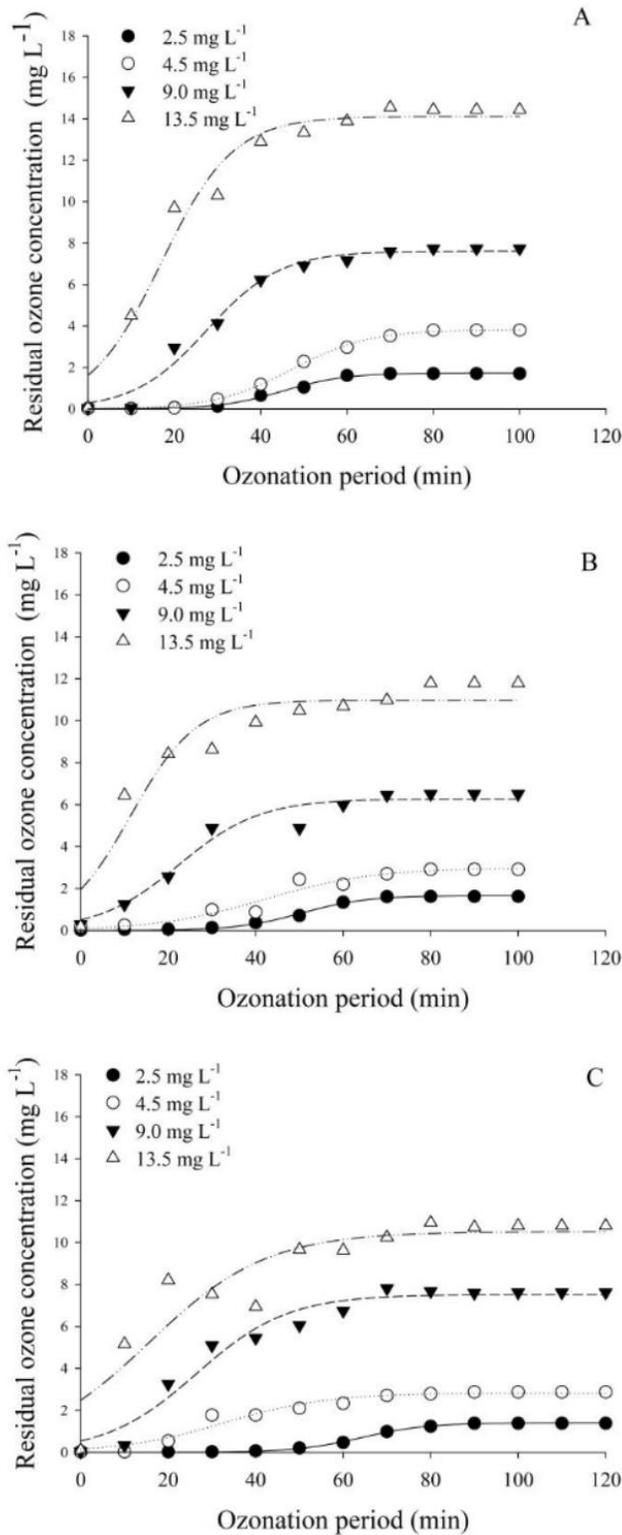


Figure 2. Residual ozone concentration in Brazil nuts at different combinations of column height (0.25 m – A; 0.50 m – B; 0.75 m – C) and inlet gas concentrations (2.5, 4.5, 9.0, and 13.5 mg L⁻¹) as a function of time.

Table 1
Adjusted regression equations and respective coefficients of determination (R²) for residual ozone concentration (mg L⁻¹) in different combinations of column height and inlet gas concentrations as a function of time

Column height (m)	Inlet concentration (C ₀ ; mg L ⁻¹)	Adjusted regression	R ²	SEE	Saturation time (t _{Sat} ; min)	Saturation concentration (C _{Sat} ; mg L ⁻¹)	C _{Sat} /C ₀
0.25	2.5	$\hat{y} = \frac{1.732}{1+e^{-\left(\frac{x-45.167}{7.180}\right)}}$	0.99	0.0615	59.5	1.52	0.61
	4.5	$\hat{y} = \frac{3.824}{1+e^{-\left(\frac{x-47.265}{8.893}\right)}}$	0.99	0.0705	65.1	3.37	0.75
	9.0	$\hat{y} = \frac{7.615}{1+e^{-\left(\frac{x-27.561}{8.485}\right)}}$	0.98	0.4319	44.5	6.70	0.74
	13.5	$\hat{y} = \frac{14.111}{1+e^{-\left(\frac{x-16.982}{8.322}\right)}}$	0.97	0.9477	33.6	12.42	0.92
0.50	2.5	$\hat{y} = \frac{1.660}{1+e^{-\left(\frac{x-50.454}{7.379}\right)}}$	0.99	0.0539	65.2	1.46	0.58
	4.5	$\hat{y} = \frac{2.987}{1+e^{-\left(\frac{x-42.133}{12.396}\right)}}$	0.95	0.2828	66.9	2.58	0.57
	9.0	$\hat{y} = \frac{6.273}{1+e^{-\left(\frac{x-22.462}{9.226}\right)}}$	0.96	0.5076	40.9	5.52	0.61
	13.5	$\hat{y} = \frac{10.976}{1+e^{-\left(\frac{x-11.460}{7.507}\right)}}$	0.91	1.1468	26.5	9.67	0.72
0.75	2.5	$\hat{y} = \frac{1.404}{1+e^{-\left(\frac{x-64.127}{7.476}\right)}}$	0.99	0.0284	79.1	1.23	0.49
	4.5	$\hat{y} = \frac{2.828}{1+e^{-\left(\frac{x-32.850}{11.709}\right)}}$	0.96	0.2320	56.3	2.49	0.55
	9.0	$\hat{y} = \frac{7.521}{1+e^{-\left(\frac{x-26.504}{10.408}\right)}}$	0.96	0.5776	47.3	6.63	0.74
	13.5	$\hat{y} = \frac{10.520}{1+e^{-\left(\frac{x-15.746}{13.440}\right)}}$	0.86	1.2858	42.6	9.26	0.69

SEE – Standard Error of Estimate.

The highest C_{Sat}/C_0 ratio obtained was 0.92, when an inlet concentration of 13.5 mg L⁻¹ was used, at a product column height of 0.25 m (Table 1). On the other hand, the lowest value was 0.49, for the inlet concentration of 2.5 mg L⁻¹ and seed column height of 0.75 m. It is important to point out that the saturation time of 65.1 min, at an ozone concentration of 4.5 mg L⁻¹ and for a column height of 0.25 m, is associated with a C_{Sat}/C_0 ratio of 0.75. However, when the ozone concentration of 2.5 mg L⁻¹ was adopted, at the same product column height, the C_{Sat}/C_0 ratio was 0.61. We can therefore state that in studies on the ozone saturation process, variables such as saturation time and saturation concentration should not be analyzed separately, and the C_{Sat}/C_0 ratio should be considered.

Souza et al. (2018) indicated the possibility that in addition to the chemical composition of the seed, its physical properties may influence the saturation process of the porous medium. Oliveira et al. (2020) observed that as ozone concentration is increased, there is an exponential reduction in the saturation time of Brazil nuts.

Quality of ozonized Brazil nuts

Despite a slight downward trend in the moisture of the ozonized product, this variation was not significant ($p > 0.05$) according to analysis of variance when considering the triple or double interaction between the *inlet ozone concentration*, *product column height*, and exposure time factors, or the factors alone. Product moisture remained in the range between 2.30 ± 0.10 and $3.70 \pm 0.20\%$.

Other studies have shown that ozonation does not significantly influence

the moisture content of the ozonized product (Roberto et al., 2016; Afsah-Hejri et al., 2020; Silva et al., 2022). It is important to stress that the relative humidity during ozonation is crucial for maintaining the product's moisture and also for inactivating microorganisms. According to Luo et al. (2014), an increase in relative humidity implies an increase in the ozone oxidation potential.

The FFA content of the crude oil varied significantly ($p < 0.05$) when only the inlet ozone concentration was considered alone. Despite this, no significant difference was found between the means ($p > 0.05$) according to Tukey's test. The mean FFA values varied between 0.23 ± 0.01 and $0.39 \pm 0.04\%$.

Peroxide value exhibited a significant variation ($p < 0.05$) as a result of inlet ozone concentration and exposure time separately. However, there was no significant difference between the mean peroxide values at the different inlet gas concentrations, according to Tukey's test ($p > 0.05$). Regarding the effect of time of exposure to ozone on PV, the variation was not significant, according to regression analysis (Table 2 and Figure 3A). It is noteworthy that the peroxide value of crude oil, whose limit as established by the Codex Alimentarius is 15 mEq kg⁻¹ (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 1999), remained in the range between 6.87 ± 0.76 and 9.15 ± 1.00 mEq kg⁻¹. For Oliveira et al. (2020), this range of variation can be attributed to the initial quality of the raw material and should therefore not be attributed to the ozonation process.

The color of Brazil nuts was evaluated by determining the lightness (L^*), color saturation or chroma (C^*), and hue angle (h^*) parameters. According to analysis of variance, lightness

varied significantly ($p < 0.05$) only according to inlet gas concentration and exposure time, when analyzed separately. On the other hand, color saturation varied significantly

($p < 0.05$) in response to exposure time alone. Hue angle showed a significant variation due to the double interaction between inlet gas concentration and exposure time ($p < 0.05$).

Table 2

Regression equations for the peroxide value of crude oil (mEq kg^{-1} , A), lightness (L^* , B), and color saturation (C^* , C) in Brazil nuts as a function of ozonization period, regardless of inlet gas concentration and product column height, and respective coefficients of determination (R^2)

Variables	Adjusted regression	R^2	SEE
Peroxide value of crude oil	$\hat{y} = 7.812$	-	-
Lightness (L^*)	$\hat{y} = \frac{77.967}{1 + e^{-\left(\frac{x+2.401}{1.116}\right)}}$	0.99	0.121
Color saturation (C^*)	$\hat{y} = \frac{12.800}{1 + e^{-\left(\frac{x+5.248}{2.411}\right)}}$	0.99	0.479

SEE – Standard Error of Estimate.

In terms of lightness, although analysis of variance indicated a significant variation due to inlet gas concentration, there was no significant difference between the mean values according to Tukey's test ($p > 0.05$). Lightness displayed an upward trend as the ozonation period increased, with the most significant increase occurring in the first three hours of ozonation (Figure 3B and Table

2), with values remaining between 70 and 80. Color saturation exhibited a similar behavior, increasing with the time of exposure to ozone (Figure 3C and Table 2). Finally, hue angle (Figure 4 and Table 3) showed an increasing trend as the time of exposure to ozone increased, which was more pronounced at the inlet gas concentrations of 9.0 and 13.5 mg L^{-1} .

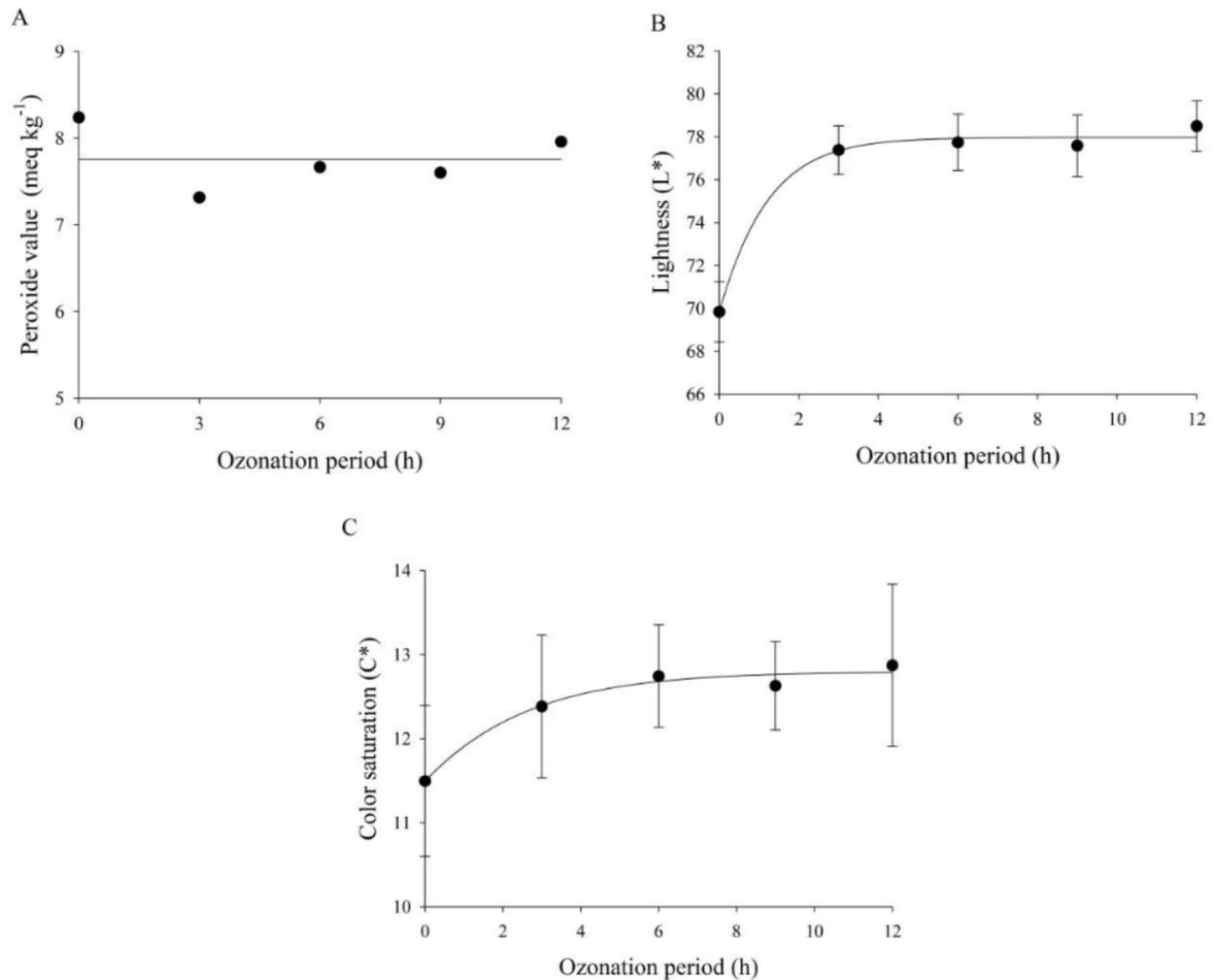


Figure 3. Regression curves for the peroxide value of crude oil (mEq kg⁻¹, A), lightness (L*, B) and color saturation (C*, C) in Brazil nuts as a function of ozonation period, regardless of inlet gas concentration and product column height.

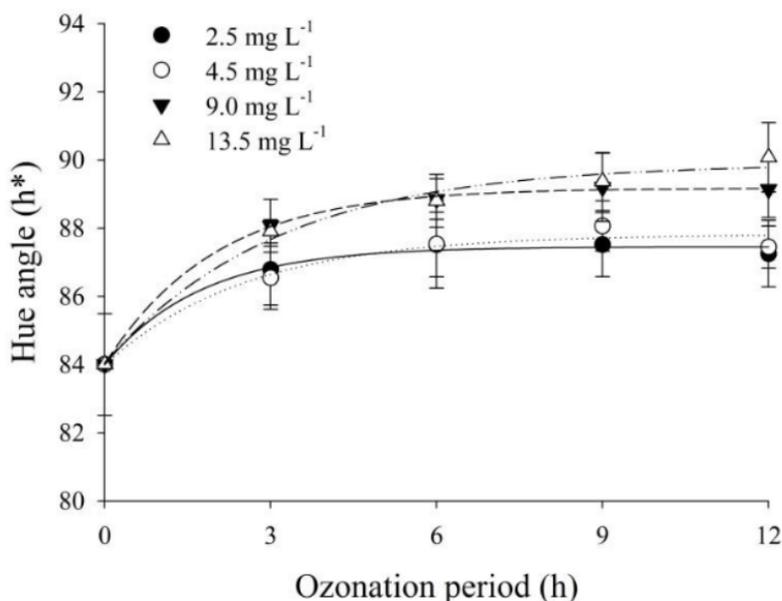


Figure 4. Regression curves for hue angle (h*) in Brazil nuts as a function of the ozonation period, at different inlet gas concentrations, regardless of product column height.

Table 3

Regression equations for hue angle (h*) in Brazil nuts as a function of ozonation period and inlet gas concentrations, regardless of product column height, and respective coefficients of determination (R²)

Inlet concentration (C ₀ ; mg L ⁻¹)	Adjusted regression	R ²	SEE
2.5	$\hat{y} = \frac{87.450}{1 + e^{-\left(\frac{x+5.383}{1.686}\right)}}$	0.99	0.198
4.5	$\hat{y} = \frac{87.815}{1 + e^{-\left(\frac{x+7.618}{2.467}\right)}}$	0.98	0.356
9.0	$\hat{y} = \frac{89.168}{1 + e^{-\left(\frac{x+5.319}{1.907}\right)}}$	0.99	0.084
13.5	$\hat{y} = \frac{89.883}{1 + e^{-\left(\frac{x+7.903}{2.962}\right)}}$	0.99	0.364

SEE – Standard Error of Estimate.

Other authors observed a variation in the color of Brazil nuts, considering L^* , C^* , and h^* , in response to the ozonation process (Freitas-Silva et al., 2013; Oliveira et al., 2020; Ferreira et al., 2021; Silva et al., 2022). These alterations may be related to the oxidation of compounds in the dark brown skin that characteristically surrounds the nut. Alencar et al. (2011) and Sanchez et al. (2016) also described these alterations in peanut seeds. It should be noted, however, that these color changes possibly do not compromise the acceptance or consumption of the product. Future studies are warranted to investigate the sensory characteristics of ozonized Brazil nuts.

Conclusions

The obtained results allow us to conclude that the height of the product's column influences saturation time and concentration during the ozonation process. The increase in inlet ozone concentration implies a reduction in saturation time, at the different heights of the Brazil nut column. The application of ozone under the adopted conditions does not affect the quality of the product to the point of rendering it unmarketable, considering its color parameter and free fatty acid content as well as the peroxide value of Brazil nut crude oil.

Acknowledgments

Thanks are extended to Coordination of Improvement of Higher Education Personnel (CAPES – Finance Code 001), National Council for Scientific and Technological Development (Grant Number no. 309843/2020-0), and Dean of Research and Innovation of the University of Brasilia.

References

- Afsah-Hejri, L., Hajeb, P., & Ehsani, R. J. (2020). Application of ozone for degradation of mycotoxins in food: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(4), 1777-1808. doi: 10.1111/1541-4337.12594
- Alencar, E. R. D., Faroni, L. R., Martins, M. A., Costa, A. R. D., & Cecon, P. R. (2011). Decomposition kinetics of gaseous ozone in peanuts. *Engenharia Agrícola*, 31(5), 930-939. doi: 10.1590/S0100-69162011000500011
- American Oil Chemists Society (1993). *Official methods and recommended practices* (4th ed.). AOCS2v.
- Bligh, E. G., & Dyer, W. J. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 37(8), 911-917. doi: 10.1139/o59-099
- Cardoso, B. R., Duarte, G. B. S., Reis, B. Z., & Cozzolino, S. M. (2017). Brazil nuts: Nutritional composition, health benefits and safety aspects. *Food Research International*, 100(2), 9-18, doi: 10.1016/j.foodres.2017.08.036
- Clescerl, L. S., Greenberg, A. E., & Eaton, A. D. (2000). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Denver.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (1999). *Codex standard for edible fats and oils not covered by individual standards*. FAO. <http://www.fao.org/docrep/004/y2774e/y2774e03.htm>
- Ferreira, W. F. D. S., Alencar, E. R. de, Blum, L. E. B., Ferreira, M. D. A., Mendonca,

- M. A., Racanicci, A. M. C., & Urruchi, W. M. I. (2021). Ozonation of Brazil nuts in aqueous media at different pH levels: ozone decomposition, *Aspergillus flavus* inactivation, and effects on nut color and crude oil lipid profile. *Ozone: Science & Engineering*, 43(4), 351-362. doi: 10.1080/01919512.2020.1799189
- Freitas-Silva, O., Morales-Valle, H., & Venâncio, A. (2013). Potential of aqueous ozone to control aflatoxigenic fungi in Brazil nuts. *International Scholarly Research Notices Biotechnology*, 2013(1), 859830. doi: 10.5402/2013/859830
- Gallo, A., Solfrizzo, M., Epifani, F., Panzarini, G., & Perrone, G. (2016). Effect of temperature and water activity on gene expression and aflatoxin biosynthesis in *Aspergillus flavus* on almond medium. *International Journal of Food Microbiology*, 217(1), 162-169. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2015.10.026
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2020). *Produção extrativa vegetal - quantidade produzida na extração vegetal por tipo de produto extrativo*. <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/castanha-do-para/br>
- Lima, L. W., Stonehouse, G. C., Walters, C., Mehdawi, A. F. E., Fakra, S. C., & Pilon-Smits, E. A. (2019). Selenium accumulation, speciation and localization in Brazil nuts (*Bertholletia excelsa* HBK). *Plants*, 8(8), 1-17. doi: 10.3390/plants8080289
- Luo, X., Wang, R., Wang, L., Li, Y., Wang, Y., & Chen, Z. (2014). Detoxification of aflatoxin in corn flour by ozone. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(11), 2253-2258. doi: 10.1002/jsfa.6550
- Maskan, M. (2001). Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying. *Journal of Food Engineering*, 48(2), 169-175. doi: 10.1016/S0260-8774(00)00154-0
- Oliveira, J. M., Alencar, E. R. de, Blum, L. E. B., Souza Ferreira, W. F. de, Botelho, S. D. C. C., Racanicci, A. M. C., & Silva, C. R. da. (2020). Ozonation of Brazil nuts: decomposition kinetics, control of *Aspergillus flavus* and the effect on color and on raw oil quality. *LWT LWT-Food Science and Technology*, 123, 109106. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109106.
- Pandiselvam, R., Subhashini, S., Banuu Priya, E. P., Kothakota, A., Ramesh, S. V., & Shahir, S. (2019). Ozone based food preservation: a promising green technology for enhanced food safety. *Ozone: Science & Engineering*, 41(1), 17-34. doi: 10.1080/01919512.2018.1490636
- Roberto, M. D. A., Alencar, E. R. D., Ferreira, W. F. D. S., Mendonça, M. A., & Alves, H. (2016). Saturação do ozônio em coluna contendo grãos de amendoim e efeito na qualidade. *Brazilian Journal of Food Technology*, 19(1), 1-8. doi: 10.1590/1981-6723.5115
- Sanchez, B. A. O., Alencar, E. R. de, Oliveira Pineli, L. D. L. de, Souza Ferreira, W. F. de, & Almeida Roberto, M. de. (2016). Tracing interactions among column height, exposure time and gas concentration to dimension peanut antifungal ozonation. *LWT-Food Science and Technology*, 65(1), 668-675. doi: 10.1016/j.lwt.2015.08.051
- Silva, M. V. A., Faroni, L. R. A., Sousa, A. H., Prates, L. H. F., & Abreu, A. O. (2019). Kinetics of the ozone gas reaction in

- popcorn kernels. *Journal of Stored Products Research*, 83(1), 168-175. doi: 10.1016/j.jspr.2019.06.014
- Silva, M. V. D. A., Faroni, L. R. D. A., Alencar, E. R. de, Sousa, A. H. de, Cecon, P. R., Nogueira, J. V. F., & Mason, V., Fº. (2022). Ozone injection at low pressure: decomposition kinetics, control of *Sitophilus zeamais*, and popcorn kernel quality. *Ozone: Science & Engineering*, 44(1), 66-78. doi: 10.1080/01919512.2021.1937043
- Souza, J. V. D. S., Alencar, E. R. D., Junqueira, A. M., & Oliveira, G. P. D. (2018). Ozone saturation and decomposition kinetics in porous medium containing different hybrids of maize. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(4), 286-291. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n4p286-291
- Sujayasree, O. J., Chaitanya, A. K., Bhoite, R., Pandiselvam, R., Kothakota, A., Gavahian, M., & Mousavi Khaneghah, A. (2022). Ozone: an advanced oxidation technology to enhance sustainable food consumption through mycotoxin degradation. *Ozone: Science & Engineering*, 44(1), 17-37. doi: 10.1080/01919512.2021.1948388
- United Nations Economic Commission for Europe (2000). *Oilseeds - determination of moisture and volatile matter content, standard. UNECE*. http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trade/agr/standard/standard/dry/dry_e/02WalnutKernels_e.pdf

