

**ARMAZENAMENTO DO MAMÃO EM ATMOSFERA CONTROLADA:
EFEITO DA FOTOCATÁLISE NO AMADURECIMENTO E NA
PRODUÇÃO DE ETILENO PELO FRUTO**

ISABELA SALLES FORYTA

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
FEVEREIRO – 2026**

**ARMAZENAMENTO DO MAMÃO EM ATMOSFERA CONTROLADA:
EFEITO DA FOTOCATÁLISE NO AMADURECIMENTO E NA
PRODUÇÃO DE ETILENO PELO FRUTO**

ISABELA SALLES FORYTA

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal”

Orientador: Prof. Jurandi Gonçalves de Oliveira

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
FEVEREIRO – 2026

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

F745

Foryta, Isabela Salles.

Armazenamento do mamão em atmosfera controlada : efeito da fotocatalise no amadurecimento e na produção de etileno pelo fruto / Isabela Salles Foryta. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2026.

77 f. : il.

Bibliografia: 55 - 65.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2026.
Orientador: Jurandi Goncalves de Oliveira.

1. conservação pós-colheita. 2. remoção de etileno. 3. taxa respiratória do mamão. 4. atmosfera controlada . 5. fotocatalise. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 630

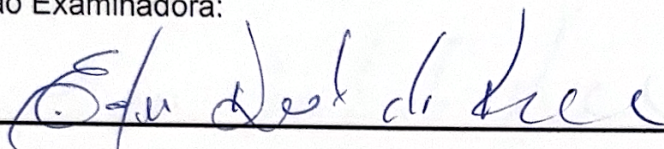
ARMAZENAMENTO DO MAMÃO EM ATMOSFERA CONTROLADA:
EFEITO DA FOTOCATÁLISE NO AMADURECIMENTO E NA
PRODUÇÃO DE ETILENO PELO FRUTO

ISABELA SALLES FORYTA

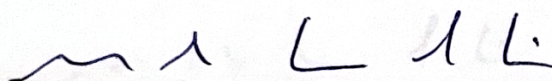
"Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal"

Aprovado em 20 de fevereiro de 2026.

Comissão Examinadora:



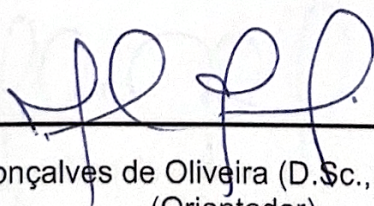
Prof. Dr. Eder Dutra de Resende (D.Sc., Engenharia Química) – UENF



Prof. Dr. Marcelo Gomes da Silva (D.Sc., Física) – UENF



Dr. Luis Miguel Mazorra Morales (D.Sc., Ciências Biológicas) – UH



Prof. Dr. Jurandi Gonçalves de Oliveira (D.Sc., Biologia Vegetal) – UENF
(Orientador)

"Dedico este trabalho aos meus pais, Marcel Foryta e Cristiane Salles, por todo o amor, incentivo e apoio incondicional ao longo da minha trajetória acadêmica e pessoal.

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação representa a conclusão de uma trajetória marcada por desafios, aprendizados e descobertas. Esse trabalho não teria sido possível sem o apoio, incentivo e colaboração de muitas pessoas, às quais expresso minha mais sincera gratidão;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jurandi Gonçalves de Oliveira, agradeço pela orientação dedicada, pela paciência e pela confiança depositada ao longo de todo o processo. Seu comprometimento, profissionalismo e exemplo de ética foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa e para o meu amadurecimento acadêmico;

À figura inspiradora do meu pai, Marcel Foryta, e à minha mãe, Cristiane Salles, expresso minha profunda gratidão pelo apoio constante, pela presença em todos os momentos e pelo incentivo ao longo de toda a minha trajetória acadêmica, contribuindo de forma essencial para que este sonho se tornasse realidade;

Aos amigos que compartilharam comigo essa jornada, contribuindo tanto na pesquisa quanto no apoio afetivo, Sandy Baia, Ana Paula da Silva, Isabelle Faria, Glória Hernández e Marcos Rosa, meu reconhecimento e gratidão;

Ao Jardel Figueiredo, agradeço pelo companheirismo diário e pelo suporte ao longo deste período;

Ao Programa de Pós-graduação em Produção Vegetal da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, agradeço pela oportunidade de formação e pelo apoio durante o mestrado;

A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) e ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias (CCTA), agradeço pela infraestrutura e pelas condições oferecidas para a realização deste trabalho;

Ao Prof. Marcelo Gomes da Silva (LCFIS/CCT), agradeço pelo apoio e pela contribuição na construção e desenvolvimento desta pesquisa;

À Prof^a Maria Cristina Canela Gazotti (LCQUI/CCT), agradeço pelo apoio e pelas contribuições valiosas para a execução deste trabalho;

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001, a qual também agradeço pelo suporte concedido;

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
2. OBJETIVOS.....	03
2.1. Objetivo geral	03
2.2. Objetivos específicos	03
3. REVISÃO DE LITERATURA	04
3.1. Fisiologia do amadurecimento do mamão.....	04
3.2. Etileno	05
3.3. Método de conservação de produtos frescos.....	06
3.4. Armazenamento sob atmosfera controlada.....	07
3.5. Controle na produção do etileno na pós-colheita	08
3.6. Fotocatálise.....	10
4. MATERIAL E MÉTODOS	13
4.1. Material vegetal.....	13
4.2. Montagem experimental para o armazenamento dos frutos em AC	14
4.3. Sistema de fotocatálise do C ₂ H ₄	16
4.4. Validação da eficiência do sistema fotocatalítico	20
4.5. Análise de qualidade dos frutos	23
4.6. Taxa respiratória e taxa de emissão de etileno.....	24
4.7. Análise estatística	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1. Caracterização visual dos frutos	27
5.2. Análises físicas e químicas nos frutos	31
6. CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS

1-MCP: 1-Metilciclopropeno
AC: Atmosfera controlada
ACC: Ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico
ACD: Atmosfera controlada dinâmica
AdoMet: Adenosilmetionina
AT: Acidez titulável
ATP: Adenosina trifosfato
AVG: Aminoetoxivinilglicina
C₂H₄: Etileno
CQV: Classificação de qualidade visual
EmEt: Emissão de etileno
ERO: Espécies reativas de oxigênio
FF: Firmeza dos frutos
LMO: Limite mínimo de oxigênio
MACC: N-malonil ACC
MF: Massa fresca
MTA: 5'-Metiltioadenosina
PMF: Perda de massa fresca
pO₂: Pressão parcial de oxigênio
PP: Polipropileno
RT: Ratio
SS: Sólido solúveis
TiO₂: Óxido de titânio
UR: Umidade relativa
TR: Taxa respiratória

RESUMO

FORYTA, Isabela Salles. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Fevereiro de 2026. Armazenamento do mamão em atmosfera controlada: efeito da fotocatalise no amadurecimento e na produção de etileno pelo fruto. Orientador: Prof. Dr. Jurandi Gonçalves de Oliveira.

O mamão (*Carica papaya* L.) é um fruto climatérico de elevada perecibilidade, cuja vida útil pós-colheita é limitada pela alta taxa respiratória e pela produção de etileno (C_2H_4) durante o amadurecimento. A atmosfera controlada (AC) constitui uma alternativa à refrigeração convencional, por permitir a redução da concentração de O_2 e o ajuste da composição gasosa, retardando os processos fisiológicos associados à senescência. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do armazenamento em AC com concentração fixa de O_2 ($\pm 3\%$), associado à remoção de C_2H_4 por fotocatalise, sobre o amadurecimento e a qualidade pós-colheita de frutos de mamão 'Aliança'. Os frutos foram armazenados por 12 dias em câmaras de AC, com e sem o uso de fotocatalise, sendo avaliados aos 0, 3, 6, 9 e 12 dias de armazenamento. Foram analisados os parâmetros de coloração da casca, perda de massa fresca (PMF), firmeza do fruto (FF), teor de sólidos solúveis (SS), acidez titulável (AT), ratio (RT), taxa respiratória (TR) e de emissão de C_2H_4 (EmEt). Os resultados demonstraram que a associação da fotocatalise ao armazenamento em AC promoveu redução significativa na produção de C_2H_4 e na TR dos frutos. Essa modulação fisiológica refletiu-se principalmente na maior manutenção da FF e no atraso nas alterações de cor da casca, indicando atraso no amadurecimento dos frutos submetidos à fotocatalise. Para os parâmetros de PMF, teor de SS e AT, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos ao longo do período de armazenamento. A análise fotoacústica confirmou a eficiência do fotocatalisador à base de dióxido de titânio (TiO_2) ativado por radiação UV-A na degradação do C_2H_4 , evidenciando a estabilidade e funcionalidade do sistema desenvolvido. O uso da fotocatalise associada a AC é uma estratégia eficaz para o controle da produção de C_2H_4 e para atrasar o amadurecimento do mamão 'Aliança', contribuindo para a manutenção da qualidade pós-colheita do fruto.

Palavras-chave: conservação pós-colheita, remoção de etileno, taxa respiratória do mamão.

ABSTRACT

FORYTA, Isabela Salles. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. February, 2026. Storage of papaya under controlled atmosphere: effect of photocatalysis on fruit ripening and ethylene production. Advisor: Prof. Dr. Jurandi Gonçalves de Oliveira.

Papaya (*Carica papaya* L.) is a climacteric fruit with high perishability, its postharvest life is limited by high respiratory activity and ethylene (C_2H_4) production during ripening. Controlled atmosphere (CA) storage is an alternative to conventional refrigeration, as it allows the reduction of O_2 concentration and adjustment of the gaseous composition, delaying physiological processes associated with senescence. The present study aimed to evaluate the effects of CA storage with a fixed O_2 concentration ($\pm 3\%$), combined with C_2H_4 removal by photocatalysis, on ripening and postharvest quality of 'Aliança' papaya fruits. Fruits were stored for 12 days in CA chambers, with or without photocatalysis, and evaluated at 0, 3, 6, 9, and 12 days of storage. Peel color, fresh mass loss (FML), fruit firmness (FF), soluble solids content (SS), titratable acidity (TA), respiratory rate (RR), and C_2H_4 emission rate (EthE) were determined. The results showed that the combination of photocatalysis and CA storage significantly reduced C_2H_4 production and RR. This physiological modulation was mainly associated with improved firmness retention and delayed peel color changes, indicating delayed ripening in fruits stored under photocatalytic conditions. No statistically significant differences were observed between treatments for FML, SS, or TA throughout the storage period. Photoacoustic analysis confirmed the efficiency of the titanium dioxide (TiO_2)-based on photocatalyst activated by UV-A radiation in C_2H_4 degradation, demonstrating the stability and functionality of the developed system. The use of photocatalysis combined with CA storage represents an effective strategy to control C_2H_4 production and delay ripening of 'Aliança' papaya, contributing to the maintenance of postharvest fruit quality.

Keywords: ethylene removal; papaya respiratory rate; postharvest conservation.

1. INTRODUÇÃO

O mamão (*Carica papaya* L.) é um fruto de grande relevância econômica para a fruticultura, tanto em âmbito nacional quanto internacional. Em 2022, o Brasil destacou-se como o quarto maior produtor mundial e o terceiro maior exportador de mamão, com volumes expressivos destinados ao mercado externo, evidenciando a importância dessa cultura para o agronegócio brasileiro (Martins et al., 2024).

Apesar de sua importância econômica, o mamão apresenta elevada perecibilidade após a colheita. Trata-se de um fruto climatérico, caracterizado por um aumento expressivo na taxa respiratória e na produção de etileno (C_2H_4) durante o amadurecimento, o que resulta em rápida perda de firmeza e redução da vida útil pós-colheita (Souza et al., 2014).

De forma geral, frutos e vegetais são produtos perecíveis, cuja rápida deterioração está associada à elevada atividade metabólica e às condições ambientais às quais são submetidos durante o armazenamento e o transporte (Brizzolara, 2020). Segundo dados da FAO (*Food and Agriculture Organization*), aproximadamente 13% dos alimentos são perdidos antes de chegarem ao varejo, principalmente nas etapas de produção, transporte e armazenamento, enquanto cerca de 17% são desperdiçados em residências, no varejo e nos serviços de alimentação. Em conjunto, as perdas e o desperdício correspondem a quase um terço do total de alimentos produzidos mundialmente, reforçando a necessidade de estratégias eficazes de conservação pós-colheita (FAO, 2023).

Entre as tecnologias disponíveis para reduzir essas perdas, o armazenamento refrigerado é amplamente reconhecido como um dos principais métodos de conservação de frutos, por sua capacidade de reduzir as taxas metabólicas e prolongar a vida útil pós-colheita (Pegoraro et al., 2015). Paralelamente, os sistemas de atmosfera controlada (AC) têm ganhado destaque por apresentar maior eficiência na redução da taxa respiratória e na inibição da produção de C_2H_4 , atrasando de forma significativa o processo de amadurecimento. Em alguns casos, a AC é utilizada de forma complementar à refrigeração, potencializando os efeitos da conservação (Goulart et al., 2022).

A maioria dos produtos agrícolas requer uma concentração mínima de oxigênio em torno de 3%, de modo a manter uma margem de segurança em relação ao ponto de compensação anaeróbica, limite abaixo do qual ocorre a transição da respiração aeróbica para a fermentação como principal via metabólica (Bessemans et al., 2018). O controle das concentrações de O_2 e CO_2 em sistemas de armazenamento pode ser realizado por métodos estáticos, nos quais são utilizadas concentrações fixas previamente definidas, ou por métodos dinâmicos, que envolvem o monitoramento e o ajuste contínuo dos níveis gasosos ao longo do período de armazenamento (Escobedo-Avellaneda e Welte-Chanes, 2016).

O C_2H_4 é um hormônio gasoso que atua na regulação do amadurecimento de frutos e vegetais, promovendo alterações fisiológicas relacionadas à coloração, ao sabor e ao aroma. Entretanto, o C_2H_4 também intensifica os processos de senescência, resultando em descoloração, amolecimento dos tecidos e maior suscetibilidade à deterioração, reduzindo significativamente a vida útil dos produtos frescos (Barry e Giovannoni, 2007).

No emprego da AC, o controle das concentrações de O_2 e CO_2 é fundamental para reduzir a taxa respiratória e a produção de C_2H_4 , uma vez que níveis de O_2 próximos a 2,5% podem diminuir a síntese de C_2H_4 em até 50%, atrasando o amadurecimento e a senescência (Pathak et al., 2019). Adicionalmente, técnicas complementares, como a oxidação fotocatalítica, têm sido utilizadas para a remoção de C_2H_4 em ambientes fechados (Pathak et al., 2017).

A oxidação fotocatalítica baseia-se no uso de radiação ultravioleta (UV) associada a materiais semicondutores, sendo o dióxido de titânio (TiO_2) o catalisador mais empregado. Esse processo é considerado uma tecnologia ambientalmente favorável, uma vez que promove a oxidação completa do C_2H_4 em CO_2 e água, sem a geração de resíduos indesejáveis (Gonzalez et al., 1999).

A compreensão da fisiologia pós-colheita do mamão e a integração de tecnologias de AC com sistemas de remoção de C_2H_4 tornam-se fundamentais para o desenvolvimento de estratégias eficazes de manejo pós-colheita. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação de um sistema de atmosfera controlada associado à fotocatalise para o armazenamento do mamão, visando contribuir o aprimoramento de tecnologias que preservem a qualidade dos frutos durante o armazenamento e reduzam as perdas pós-colheita.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar o efeito do armazenamento em AC com concentração fixa de O₂ a 3%, associado à remoção de C₂H₄ por fotocatalise, sobre o amadurecimento e a qualidade pós-colheita de frutos de mamão 'Aliança'.

2.2. Objetivos específicos

- ✓ Desenvolver e implementar um sistema de AC com concentração fixa de O₂ a 3%, para frutos de mamão;
- ✓ Integrar o sistema de AC a um dispositivo fotocatalítico à base de TiO₂ ativado por radiação UV, visando à remoção do C₂H₄ do ambiente de armazenamento;
- ✓ Determinar os efeitos da fotocatalise associada a AC sobre a produção de C₂H₄ e a taxa respiratória (TR) dos frutos durante o armazenamento;
- ✓ Avaliar as alterações nos parâmetros físicos e químicos de qualidade pós-colheita dos frutos, incluindo firmeza do fruto (FF), coloração da casca, perda de massa fresca (PMF), teor de sólidos solúveis (SS), acidez titulável (AT) e ratio (RT).

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Fisiologia do amadurecimento do mamão

O mamão (*C. papaya* L.) destaca-se como um dos principais frutos cultivados em regiões tropicais e subtropicais ao redor do mundo. A produção de mamão é especialmente expressiva na América Central e do Sul, com destaque para o Brasil, além de ser amplamente cultivado em diversas áreas da Ásia e da África (Koul et al., 2022).

O Brasil ocupa uma posição de destaque no cenário internacional como o quarto maior produtor de mamão. No contexto nacional, o estado do Espírito Santo se sobressai como um dos principais produtores e maior exportador do fruto, sendo responsável, em 2023, por 39,6% das exportações brasileiras de mamão (FAO, 2024). As variedades cultivadas no Espírito Santo pertencem, predominantemente, aos grupos Solo e Formosa. O grupo Solo compreende frutos menores, com peso variando entre 350 g e 600 g, conhecidos popularmente como “mamão papaya”, “mamão Havai” ou “mamão Amazonas”. Entre as cultivares mais relevantes desse grupo destacam-se 'Aliança', 'Sunrise Solo', 'Sunrise Golden', 'THB' e 'BS'. O grupo Formosa, por sua vez, é composto por plantas que produzem frutos maiores, com peso superior a 1,0 kg. Os principais híbridos deste grupo cultivados no Espírito Santo incluem 'Tainung Nº 1', 'Calimosa', 'T2', 'Candy' e 'Vitória', além da 'Incaper-Rubi 511' (Martins et al., 2024).

O mamão é um fruto de padrão respiratório climatérico, caracterizado por um aumento significativo na produção de C_2H_4 e na taxa respiratória durante o período de amadurecimento. Quando colhido em estágio fisiologicamente maduro, o mamão passa por mudanças bioquímicas e físicas intensas (Fabi e Prado, 2019). Durante o amadurecimento, a mudança de coloração da casca, do verde para o amarelo, inicia-se a partir da extremidade distal progredindo para a região proximal do fruto, enquanto a mudança na coloração e o amolecimento da polpa progredem do endocarpo em direção ao epicarpo. Esse processo ocorre em resposta às alterações fisiológicas e bioquímicas que determinam a qualidade final do fruto (Paull e Oliveira, 2020).

Durante o armazenamento pós-colheita de longo prazo transformações bioquímicas e físicas acontecem nos frutos, ainda que em baixas taxas, o que

impacta de maneira significativa alguns componentes químicos, metabólicos e estruturais dos frutos (Liu et al., 2024). Tais transformações promovem alterações em vias metabólicas e respiratórias, além de alterações físicas e químicas nos tecidos do fruto. Esses efeitos podem influenciar diretamente na qualidade e na vida-útil do produto, destacando a importância de técnicas adequadas de conservação (Zhou et al., 2024).

3.2. Etileno

O etileno, ou eteno, apresenta-se em estado gasoso sob condições ambientais normais. O mesmo tem ação hormonal nos vegetais, desempenhando um papel regulador em diversos processos do ciclo de vida das plantas, incluindo a germinação de sementes, iniciação e desenvolvimento de raízes e pelos radiculares, desenvolvimento floral, determinação do sexo, amadurecimento de frutos, senescência e respostas a estresses bióticos, como ataques de patógenos e abióticos, tais como ferimentos, hipóxia e baixas temperaturas (Poel et al., 2015).

A descoberta da atividade biológica do C_2H_4 remonta ao século XIX, quando se observou que vazamentos de gás de iluminação provocavam senescência precoce e desfolha em plantas de estufas e em árvores localizadas próximas às linhas de distribuição de gás. Em 1901, foi comprovado que o componente ativo responsável por esses efeitos era o C_2H_4 , marcando o início da compreensão do papel desse gás como regulador de processos fisiológicos em plantas (Abeles et al., 1992).

Yang e Hoffman (1984) estabeleceram a rota de biossíntese do C_2H_4 , na qual o aminoácido metionina atua como seu precursor. Nessa via, o S-adenosilmetionina (SAM) é inicialmente transformado em ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC) pela enzima ACC sintetase (ACS). Em seguida, o ACC é convertido em C_2H_4 pela ACC oxidase (ACO), em uma reação de oxidação dependente de O_2 e ferro, cuja atividade é estimulada pela presença de O_2 (Yang e Hoffman, 1984). O C_2H_4 é sintetizado por todas as células vegetais ao longo do desenvolvimento das plantas, embora as taxas de produção variem entre tecidos e estádios de desenvolvimento. As maiores taxas de emissão são geralmente observadas em tecidos meristemáticos, em condições de estresse ou durante o processo de amadurecimento dos frutos (Liu et al., 2020).

Durante o amadurecimento, o C_2H_4 regula a expressão de genes associados a diversos processos biológicos. Entre esses processos, destacam-se o aumento da taxa respiratória, a produção autocatalítica de C_2H_4 , o acúmulo e degradação de pigmentos, as alterações na textura da polpa e o desenvolvimento de características gerais de qualidade dos frutos. Essas mudanças promovidas pelo C_2H_4 são essenciais para a obtenção das propriedades sensoriais e nutricionais que determinam a aceitação dos frutos pelo consumidor e sua viabilidade para o mercado (Liu et al., 2020).

3.3. Métodos de conservação de produtos frescos

Os alimentos estão sujeitos à contaminação e deterioração devido à ação de microrganismos, enzimas e reações oxidativas intrínsecas relacionadas ao metabolismo do órgão vegetal. Para minimizar esses efeitos, são empregadas técnicas de conservação que reduzem o crescimento microbiano e preservam as características nutricionais e sensoriais, prolongando a vida útil dos produtos (Barros et al., 2020). Os produtos perecíveis podem ser armazenados de diferentes maneiras, dependendo das condições ambientais e dos recursos disponíveis (Schudel et al., 2023).

A redução da temperatura é um dos principais fatores na conservação pós-colheita de frutos, pois diminui a taxa dos processos bioquímicos e fisiológicos, retardando a senescência (Brizzolara et al., 2020). A refrigeração é amplamente utilizada para desacelerar reações metabólicas e reduzir a decomposição por microrganismos. Além disso, a umidade relativa (UR) do ar no ambiente de armazenamento influencia diretamente a taxa de transpiração dos frutos (Oliveira e Mendes, 2021).

O uso do armazenamento sob atmosfera modificada (AM) é uma técnica utilizada na conservação pós-colheita de frutos e hortaliças, baseada na utilização de filmes plásticos para limitar as trocas gasosas e reduzir a perda de água. Esse método preserva a qualidade do produto e é recomendado para itens de alto valor agregado, nos quais a viabilidade econômica justifica sua aplicação. Além disso, permite o manuseio direto dos frutos sem comprometer sua integridade e características sensoriais (Mahajan e Lee, 2023).

A embalagem da AM utiliza filmes poliméricos para alterar a composição gasosa ao redor do produto, caracterizando-se por alta concentração de CO_2 e

baixo teor de O_2 (Mahajan e Lee, 2023). Essa modificação reduz a taxa respiratória, a biossíntese do C_2H_4 e minimiza a perda de água, contribuindo para a conservação pós-colheita. Além disso, a embalagem atua como barreira contra contaminantes e patógenos, preservando a qualidade do alimento. Os materiais mais empregados incluem filmes plásticos, sendo os plásticos os mais utilizados por sua flexibilidade, versatilidade e baixo custo (Oliveira e Mendes, 2021).

O armazenamento em AC é uma tecnologia utilizada para prolongar a conservação de frutos e hortaliças, baseada na redução da concentração de O_2 e no aumento do CO_2 no ambiente de armazenamento (Oliveira e Mendes, 2021). Essa modificação minimiza as trocas gasosas relacionadas à respiração, reduzindo a atividade metabólica do produto sem comprometer a viabilidade celular dos tecidos vegetais. O processo exige câmaras herméticas e controle rigoroso da composição atmosférica por meio da adição ou remoção de gases (CO_2 , O_2 e C_2H_4) (Delele et al., 2019).

No contexto do armazenamento pós-colheita, a associação da refrigeração com atmosferas modificadas, caracterizadas por elevados níveis de CO_2 e baixa concentração de O_2 , tem sido amplamente empregada para prolongar a vida útil de produtos hortícolas. A combinação dessas condições reduz a respiração, restringindo a disponibilidade de oxigênio para o metabolismo celular e, conseqüentemente, retardando a deterioração e a perda da qualidade dos frutos (Poonsri, 2021).

3.4. Armazenamento sob atmosfera controlada

O armazenamento em AC consiste na modificação inicial da composição gasosa ambiente e manutenção de concentrações específicas dos gases O_2 e CO_2 , de acordo com condições ideais para prolongar a vida útil de produtos hortifrutícolas (Raghavan e Gariepy, 1985). Essa técnica reduz a taxa de respiração e a produção de C_2H_4 , retardando o amadurecimento e a senescência. Amplamente utilizada no manejo pós-colheita, a AC é eficaz na preservação da qualidade sensorial e estrutural dos produtos frescos (Kandasamy e Mukherjee, 2019).

Por se tratar de um fruto climatérico, o manejo pós-colheita do mamão tem sido direcionado ao controle das condições que favorecem o aumento da taxa respiratória e da produção de C_2H_4 (Romani, 1984). Nesse sentido, diferentes estudos têm avaliado o uso da atmosfera controlada e da atmosfera modificada

como estratégias para atrasar o amadurecimento e prolongar a vida útil do mamão. Resultados positivos foram observados com a redução da concentração de O_2 e o aumento moderado de CO_2 , promovendo diminuição da respiração, atraso no amolecimento da polpa e manutenção da qualidade visual dos frutos durante o armazenamento (Martins e Resende, 2013). Além disso, o controle da composição gasosa tem sido associado à menor incidência de distúrbios fisiológicos e à redução da atividade metabólica, contribuindo para a preservação da qualidade pós-colheita do mamão durante o transporte e a comercialização (Brizzolara et al., 2020).

A maioria dos produtos de origem vegetal necessita de uma concentração de O_2 ambiente, mínima, de aproximadamente 3% para evitar o início do metabolismo anaeróbico (Imahori et al., 2004). Essa redução dos níveis de O_2 durante o armazenamento contribui para a diminuição da taxa respiratória, reduz a biossíntese de C_2H_4 e atrasa os processos de maturação e senescência dos frutos (Riaño et al., 2022).

Quando os níveis de O_2 atingem valores limitantes, abaixo de 1%, a respiração aeróbica mitocondrial é inibida, levando os tecidos vegetais a recorrerem à via da fermentação, que é energeticamente menos eficiente (Benkeblia, 2021). Esse processo pode resultar na produção de metabólitos indesejáveis, como acetaldeído, ácido acético e etanol, afetando a qualidade do produto armazenado (Wright et al., 2015).

Embora as condições atmosféricas ideais para o armazenamento do mamão ainda não estejam seguramente definidas, estudos indicam que concentrações de 2 a 5% de O_2 e 5 a 8% de CO_2 podem ser adequadas (Paull e Oliveira, 2020).

A aplicabilidade de AM e AC para o mamão ainda carece de mais pesquisa. Mais estudos com o uso de AC são necessários para validar o uso potencial da AC e estabelecer parâmetros que garantam sua eficácia na manutenção da qualidade e prolongamento da vida útil do mamão durante o seu armazenamento (Paull e Oliveira, 2020).

3.5. Controle na produção do etileno na pós-colheita

Durante o armazenamento, frutos e hortaliças são constantemente expostos ao C_2H_4 , que pode ser originado endogenamente, a partir da produção pelos próprios produtos armazenados, através de processos metabólicos, ou de origem exógena, proveniente da atmosfera circundante (Saltveit, 1999).

Diversos compostos fisiologicamente ativos têm demonstrado eficácia na mitigação dos efeitos prejudiciais do C_2H_4 em produtos vegetais. Inibidores da biossíntese de C_2H_4 , como a aminoetoxivinilglicina (AVG), têm sido amplamente estudados, com benefícios comprovados na qualidade pós-colheita de frutos (Liu et al., 2022).

Inibidores da ação do C_2H_4 , como o 1-metilciclopropeno (1-MCP), destacam-se pela capacidade de impedir a ativação de processos fisiológicos induzidos pelo C_2H_4 , contribuindo significativamente para retardar a maturação, prolongar a vida de prateleira e preservar a qualidade de frutos e hortaliças (Satekge e Magwaza, 2022).

Apesar do 1-MCP ser amplamente reconhecido como uma ferramenta eficaz e economicamente acessível para o manejo pós-colheita, sua aplicação pode estar associada a limitações e efeitos indesejáveis (Zhang et al., 2020). Entre os principais desafios estão o aumento da suscetibilidade a doenças, como observado em mamões e a ocorrência de problemas relacionados ao amadurecimento irregular (Meng et al., 2023). Tratamentos longos ou doses inadequadas com 1-MCP podem causar distúrbio de amadurecimento com textura “emborrachada”, ligada a forte inibição de vias de degradação de componentes da parede celular e mudanças no metabolismo do fruto (Li et al., 2023).

Diante dessas limitações, alternativas técnicas que envolvam a remoção do C_2H_4 no ambiente de armazenamento têm se mostrado promissoras. Estratégias dessa natureza podem reduzir efetivamente as perdas associadas à presença de C_2H_4 exógeno, promovendo a manutenção da qualidade dos produtos e minimizando os efeitos negativos observados com o uso de inibidores químicos (Pathak et al., 2017; Wei et al., 2021).

Por outro lado, adsorvedores de C_2H_4 , como zeólitas, paládio, carvão ativado e permanganato de potássio ($KMnO_4$) têm sido amplamente utilizados para prevenir o acúmulo desse gás durante o armazenamento de frutos e outros produtos de origem vegetal. Métodos complementares, como ventilação por ar, oxidação catalítica em altas temperaturas, armazenamento hipobárico e biofiltração, também são empregados (Wei et al., 2021).

Contudo, essas abordagens apresentam limitações, incluindo eficácia reduzida na remoção de C_2H_4 , necessidade de longos períodos de exposição para alcançar efeitos significativos, e em alguns casos, dificuldades relacionadas ao

manejo e ao descarte de resíduos (Keller et al., 2003). Técnicas emergentes, baseadas na oxidação fotocatalítica e fotoquímica, têm se destacado como alternativas promissoras (Lourenço et al., 2017). Essas técnicas oferecem maior eficiência, menor impacto ambiental e potencial para superar os desafios associados aos métodos tradicionais, representando um avanço significativo no manejo de C_2H_4 em sistemas de armazenamento (Pathak et al., 2017).

No emprego da AC concentrações adequadas de O_2 e CO_2 desempenham um papel importante na preservação da qualidade pós-colheita, pois reduzem as taxas de respiração e a síntese de C_2H_4 , sendo que, em níveis de oxigênio próximos a 2,5%, a produção de C_2H_4 pode ser reduzida pela metade, retardando o amadurecimento (Keller et al., 2013). Paralelamente, técnicas baseadas na oxidação fotocatalítica do C_2H_4 emergem como estratégias complementares. Essas abordagens, ao serem integradas ao uso de AC, oferecem um controle adicional sobre a produção e ação do C_2H_4 (Pathak et al., 2017).

3.6. Fotocatálise

Diversas estratégias são utilizadas para controlar os efeitos do C_2H_4 em frutos e vegetais. O armazenamento sob refrigeração ou em ambientes ventilados é uma prática comum que reduz o metabolismo dos produtos, conseqüentemente reduzindo a produção do C_2H_4 (Wills, 2021). No entanto, sua eficácia pode ser limitada, pois requer um alto consumo de energia, elevando os custos operacionais. Outra alternativa consiste no uso de adsorventes químicos que adsorvem o C_2H_4 (Basso et al., 2018).

A fotocatálise é classificada de acordo com a fase em que o catalisador se encontra em relação ao substrato. Quando ambos estão na mesma fase, geralmente em solução, o processo recebe a denominação de fotocatálise homogênea (Mohamadpour e Amani, 2024). Quando catalisador e substrato pertencem a fases diferentes, situação comum em sistemas que utilizam catalisadores sólidos atuando sobre substratos líquidos ou gasosos, o processo é definido como fotocatálise heterogênea (Xu et al., 2019).

A fotocatálise heterogênea ganhou destaque a partir da década de 70, período em que estudos com células fotoeletroquímicas começaram a ser conduzidos com foco na produção de combustíveis a partir de materiais de baixo

custo. Esses esforços buscavam explorar a conversão de energia solar em energia química, impulsionando o desenvolvimento dessa área (Marques et al., 2017).

O fotocatalisador geralmente é ativado pela absorção de fótons com comprimentos de onda específicos, permanecendo inalterado e não consumido ao final do processo. Entre os semicondutores utilizados na fotocatalise, o dióxido de titânio (TiO_2) destaca-se como o mais amplamente empregado (Kang et al., 2019).

Em 1972, Fujishima e Honda identificaram a atividade fotocatalítica do TiO_2 em suspensão, que quando irradiado em uma célula fotoeletroquímica, é capaz de promover a oxidação da água, resultando na geração de hidrogênio e oxigênio (Fujishima e Honda, 1972). A partir desse período, intensificaram-se os estudos voltados à compreensão dos processos fotocatalíticos relacionados à oxidação da água e de íons inorgânicos, em sistemas nos quais semicondutores eram submetidos à irradiação luminosa. O avanço conceitual da área passou a incorporar a teoria de bandas dos sólidos, que fornece a base para interpretar os fenômenos envolvidos no comportamento fotocatalítico desses materiais (Marques et al., 2017).

Fotocatalisadores heterogêneos são materiais semicondutores que apresentam uma banda de condução (BC) e uma banda de valência (BV) separadas por um intervalo de energia conhecido como *band gap* (E_g) e determina a energia mínima necessária para a excitação eletrônica. Quando esses materiais absorvem radiação com energia igual ou superior a esse intervalo, elétrons da BV são promovidos para a BC, gerando lacunas com comportamento de carga positiva. Elétrons e lacunas passam, então, a atuar como portadores de carga (Marques et al., 2017).

Quando o material é irradiado com fótons provenientes da luz UV cuja energia é igual ou superior ao *band gap* ($h\nu \geq E_g$), elétrons são promovidos da banda de valência para a banda de condução, gerando pares elétron-lacuna (e^-/h^+) (Figura 1). Esses portadores de carga podem migrar até a superfície do semicondutor e participar de reações de redução do O_2 e da oxidação da H_2O , levando à formação de espécies reativas de O_2 como os radicais ânion superóxido ($\text{O}_2^{\bullet-}$) e hidroxila (OH^\bullet), respectivamente, responsáveis pela degradação de compostos orgânicos, como o C_2H_4 . A oxidação do C_2H_4 gera CO_2 e H_2O . No caso do TiO_2 , o valor do *band gap* varia conforme a fase cristalina, sendo

aproximadamente 3,2 eV para a anatase e 3,0 eV para o rutilo, o que limita sua ativação principalmente à região do ultravioleta (Chen e Mao, 2007).

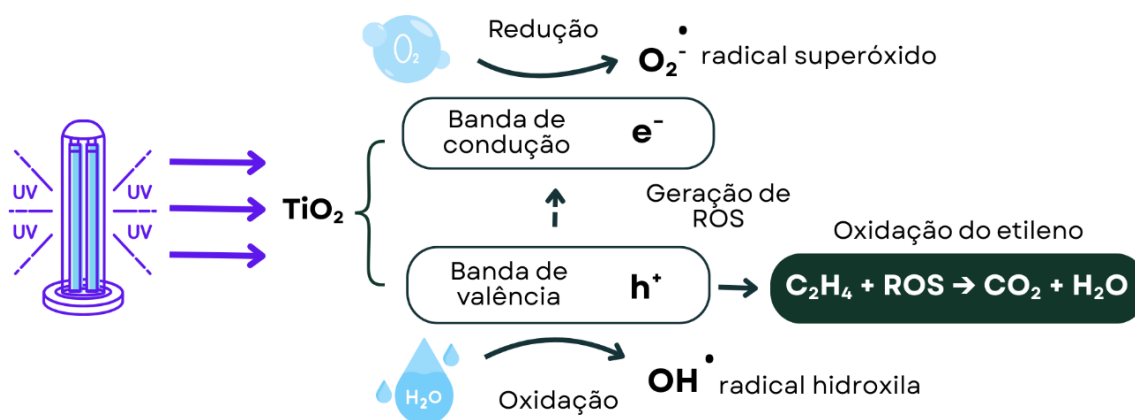


Figura 1: Esquema ilustrativo do mecanismo de fotocatalise do TiO_2 sob radiação UV. A absorção de fótons promove a excitação de elétrons da banda de valência para a banda de condução, gerando pares elétron-lacuna (e^-/h^+). Esses portadores de carga participam de reações de oxirredução, resultando na formação de espécies reativas de oxigênio (ROS), como radicais hidroxila (OH^\bullet) e ânion superóxido ($\text{O}_2^{\bullet-}$), responsáveis pela oxidação do C_2H_4 em CO_2 e H_2O .

Essa dinâmica de excitação de elétrons é essencial para ativar as reações de oxidação que ocorrem na superfície do catalisador. A fotocatalise do TiO_2 em contato com gases atmosféricos pode desempenhar um papel significativo na remoção do C_2H_4 em sistemas de armazenamento de frutos (Maldonado et al., 2024).

Apesar do grande potencial dessas técnicas para a remoção eficiente de C_2H_4 em sistemas de armazenamento pós-colheita, sua aplicação no armazenamento de frutos e vegetais tem recebido atenção limitada. O uso dessas abordagens pode contribuir significativamente para prolongar a vida útil e manter a qualidade dos produtos durante o armazenamento, destacando a importância de ampliar estudos e investigações nesse campo (Pathak et al., 2019).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Material vegetal

A pesquisa foi realizada com frutos de mamão (*C. papaya* L. 'Aliança') no estágio verde-maduro, caracterizado por 90% da casca verde. Os frutos foram adquiridos no comércio local e transportados para a unidade de Bioquímica e Fisiologia Pós-Colheita de Frutos e Hortaliças do Setor de Fisiologia Vegetal (LMGV-CCTA/UENF).

No laboratório os frutos foram selecionados quanto à uniformidade de tamanho e aparência, sendo posteriormente submetidos à sanitização em solução de hipoclorito de sódio (NaClO). Para o preparo da solução, utilizou-se água sanitária comercial contendo 2,5% de cloro ativo, a qual foi diluída a 10% (v/v), correspondendo à adição de 100 mL de água sanitária em 900 mL de água, totalizando 1 L de solução. Os frutos permaneceram imersos nessa solução por aproximadamente 10 minutos. Nas quatro últimas repetições os mamões foram submetidos a um tratamento hidrotérmico, conforme a metodologia de Magolin et al. (2018), onde o mesmo foi realizado em um banho térmico (Fisatom, Modelo 588), imergindo a região peduncular do fruto, em água na temperatura de 70 °C durante 15 segundos.

Na caracterização inicial (tempo 0), três frutos foram avaliados quanto aos seguintes parâmetros: perda de massa fresca (PMF), coloração da casca, teor de sólidos solúveis (SS), firmeza do fruto (FF), acidez titulável (AT), ratio (RT), taxa respiratória (TR) medida a partir do CO₂ e a taxa de emissão de C₂H₄ (EmEt).

Os 12 frutos foram distribuídos em quatro câmaras de armazenamento, cada uma com capacidade de 7 L, sendo alocados três frutos por câmara. Os frutos acondicionados foram mantidos em temperatura ambiente de 25 °C e umidade relativa de aproximadamente 90%. A cada período de armazenamento (3, 6, 9 e 12 dias), uma câmara foi aberta para a realização das análises de PMF, coloração da casca, teor de SS, AT, RT, TR e a EmEt. Foram realizadas três repetições para cada tratamento, sendo eles, com a lâmpada do fotocatalisador desligada e com a lâmpada do fotocatalisador ligada.

4.2. Montagem experimental para o armazenamento dos frutos em AC

A AC foi estabelecida por meio do controle da composição gasosa no interior de câmaras de armazenamento constituídas por dessecadores com volume aproximado de 7,0 L, nos quais os frutos foram acondicionados e mantidos por até 12 dias em temperatura ambiente. O sistema de armazenamento utilizado encontra-se esquematicamente representado na Figura 2.

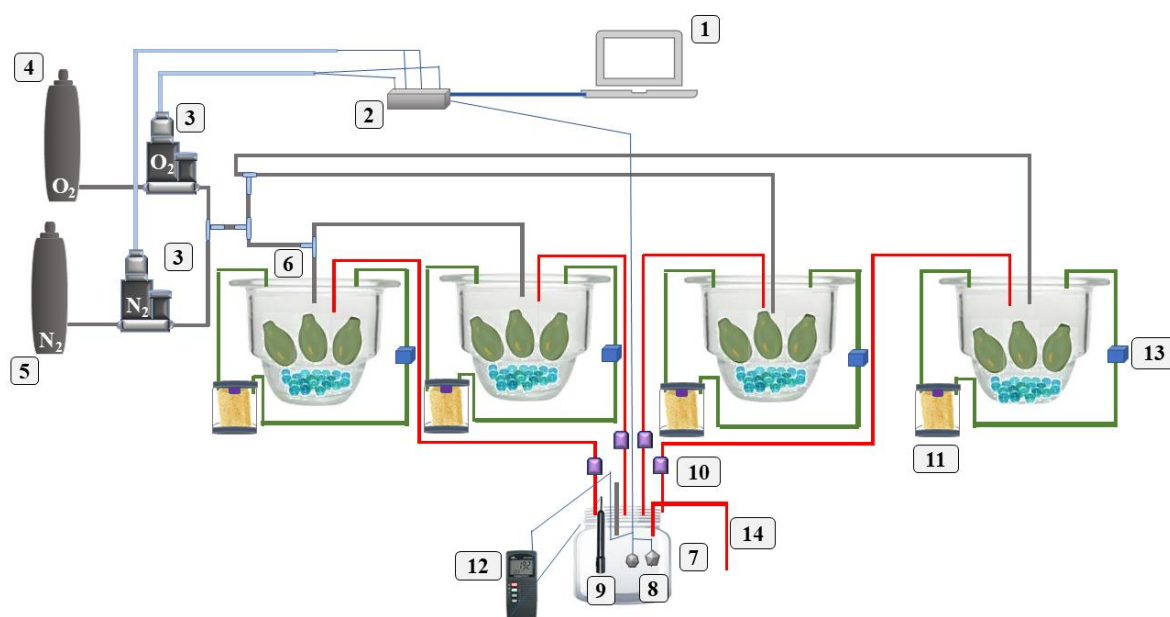


Figura 2: Imagem representativa do sistema de armazenamento do mamão em AC com fotocatalise. O sistema é composto de: 1) Computador; 2) Microcontrolador; 3) Fluxômetros de massa; 4) Cilindro de gás O₂; 5) Cilindro de gás nitrogênio; 6) Dessecadores; 7) Câmara de análise; 8) Sensor de temperatura; 9) Oxímetro; 10) Válvula solenoide; 11) Fotocatalisador; 12) Sensor de O₂; 13) Bomba de fluxo de ar; 14) Tubo para expurgo do ar.

A montagem, identificada pelo esquema ilustrado na Figura 2 é constituída pelos seguintes componentes: 1) Computador, usado para a programação, monitoramento e comando do microprocessador, além do armazenamento, apresentação e análise dos dados dos sensores (O₂, UR e temperatura) e fluxômetros; 2) Microcontrolador (ATMEGA2560, Arduino), responsável por receber e enviar os dados para os fluxômetros, processar e enviar as informações ao computador, além de também atuar no controle dos fluxômetros e válvulas solenoides para regular a entrada de gases nas câmaras; 3) Fluxômetros de massa (Brooks 5850S), usado para controlar a vazão dos gases, N₂ e O₂, para o controle da concentração de O₂ desejada dentro da câmara de armazenamento; 4) Cilindro

de gás oxigênio (O_2 , 99,99%, White Martins), para insuflar O_2 dentro das câmaras para a obtenção da composição gasosa desejada para o armazenamento em AC; 5) Cilindro de gás nitrogênio (N_2 , 99,99%, White Martins), para insuflar N_2 dentro das câmaras para a obtenção da composição gasosa desejada para o armazenamento em AC; 6) Dessecadores (volume de 7,0 L) usados como câmaras para o armazenamento dos frutos; 7) Câmara de análise, usada para acondicionar os sensores para o monitoramento das condições de operação das câmaras a partir do direcionamento do fluxo de ar de cada câmara, individualmente, a cada 10 minutos, pela ação das válvulas solenoides; 8) Sensor de UR e temperatura (DHT22), responsável pelo monitoramento da UR e temperatura dentro da câmara; 9) Oxímetro, usado para medir as concentrações de O_2 nas câmaras; 10) Válvula solenoide, responsável por controlar a abertura e o fechamento da passagem de ar, permitindo o direcionamento sequencial do fluxo proveniente de cada câmara de armazenamento para a câmara de análise. A alternância ocorre em intervalos de 10 minutos, possibilitando a amostragem periódica das condições atmosféricas de cada câmara. Quando a câmara não está sendo direcionada para análise, o sistema opera em modo de expurgo, conduzindo o fluxo de ar para o ambiente externo do laboratório; 11) Fotocatalisador, catalisador semicondutor de TiO_2 com luz UV, responsável pela eliminação do C_2H_4 dentro de cada câmara de armazenamento; 12) Sensor de O_2 (DO-5519, Lutron, EUA), responsável pelo monitoramento da concentração de O_2 dentro das câmaras de armazenamento; 13) Bomba de circulação de ar (Gilair Plus, EUA), tem a função de direcionar o fluxo de ar da câmara de armazenamento para o fotocatalisador, garantindo a circulação adequada dos gases no sistema de fotocatalise.

O sistema funciona da seguinte forma: os cilindros de N_2 e O_2 alimentam o conjunto experimental, e a vazão desses gases é controlada por fluxômetros, o que permite ajustar a concentração de O_2 desejada para o armazenamento sob atmosfera controlada. A mistura gasosa no interior das câmaras é monitorada continuamente por sensores de umidade relativa e de O_2 . As informações geradas pelos sensores são enviadas a um microprocessador, responsável pelo processamento dos dados e encaminhamento das leituras ao computador. Os ajustes na concentração de O_2 podem ser realizados manualmente pelo operador, por meio dos fluxômetros, ou automaticamente, quando o sistema é programado

para atuar por intermédio do microcontrolador Arduino. Todas as modificações e registros são armazenados na memória do computador.

A montagem experimental representada na Figura 2 mostra os componentes utilizados na análise da composição gasosa para o armazenamento dos frutos sob atmosfera controlada. O sistema corresponde a um modelo automatizado de controle de O₂, desenvolvido com o uso das linguagens C/C++ e Python. No microcontrolador, a programação em C/C++ permitiu implementar um algoritmo proporcional capaz de realizar leituras e ajustes das concentrações de O₂ e N₂ em tempo real, utilizando fluxômetros de massas (Brooks, 5850S, USA). A linguagem Python foi empregada na construção de uma interface de operação mais intuitiva, que facilitou o acompanhamento dos parâmetros monitorados e o gerenciamento das informações registradas.

Como unidade coordenadora do sistema, o Arduino integrou as funções de monitoramento, registro e controle das condições internas das câmaras. Os cilindros de O₂ e N₂ foram utilizados para estabelecer a composição gasosa desejada, enquanto os fluxômetros permitiram regular a quantidade de gás introduzida nas câmaras de armazenamento, sendo de 300 sccm (mL/minuto). Após o ajuste da vazão, a mistura gasosa saturava o interior da câmara, que operava em fluxo contínuo. O gás circulante atingia o eletrodo de O₂ presente na câmara de análise, permitindo a medição da concentração de 10 em 10 minutos de cada câmara e fazendo a correção para 3% de O₂.

4.3. Sistema de fotocatalise do C₂H₄

Para a remoção do C₂H₄ no interior das câmaras de armazenamento, empregou-se a técnica de fotocatalise, conforme descrito por Lourenço et al. (2017). O material fotocatalítico utilizado foi composto por TiO₂ depositado sobre uma superfície apropriada e ativado por radiação UV, com comprimento de onda aproximado de 365 nm (nanômetros), atuando como agente oxidante do C₂H₄ acumulado durante o armazenamento dos frutos.

A montagem do sistema fotocatalítico foi necessária para a preparação do TiO₂ pelo método sol-gel, seguindo o procedimento proposto por Xu e Anderson (1994). Esse método consiste na síntese inorgânica do óxido por meio de etapas de hidrólise e condensação do precursor molecular isopropóxido de titânio (Ti[OCH(CH₃)₂]₄). O processo envolve as seguintes fases: 1) hidrólise do precursor,

com formação de grupos hidroxila; 2) condensação com eliminação de água; 3) condensação cruzada, originando partículas submicrométricas ou estruturas poliméricas; 4) gelificação, resultando em uma rede tridimensional e 5) desidratação por aquecimento. As etapas do processo estão esquematicamente representadas na Figura 3.

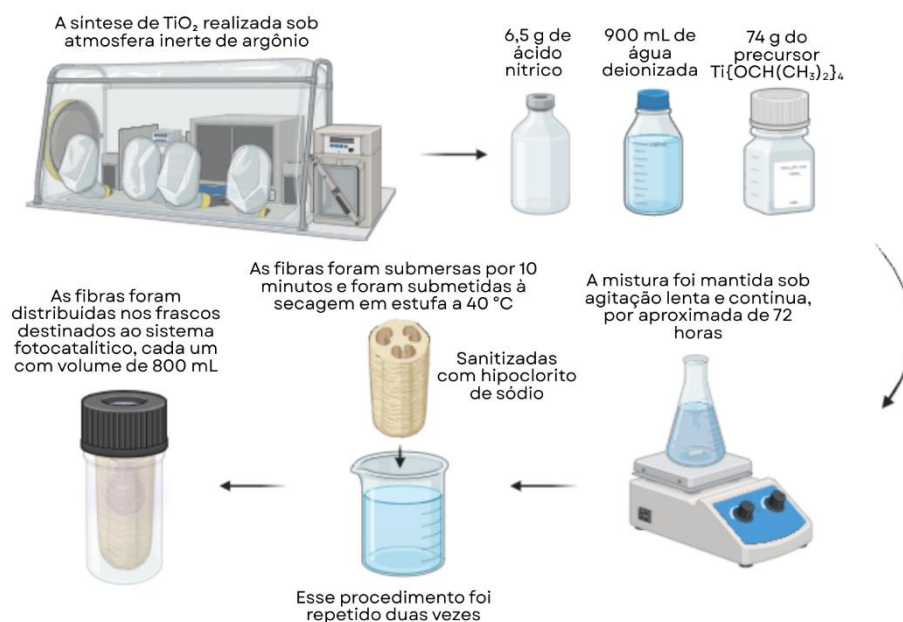


Figura 3: Esquema ilustrativo do processo de síntese do TiO_2 e sua impregnação em fibras de *Luffa cylindrica*. A síntese do material fotocatalítico foi realizada sob atmosfera inerte de argônio, utilizando ácido nítrico, água deionizada e o precursor isopropóxido de titânio ($\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$), com agitação contínua por aproximadamente 72 horas. As fibras vegetais, previamente sanitizadas em solução de hipoclorito de sódio, foram imersas na suspensão fotocatalítica por 10 minutos e submetidas à secagem em estufa a 40°C . O procedimento de impregnação foi repetido duas vezes, sendo posteriormente as fibras distribuídas em frascos destinados ao sistema fotocatalítico.

Para a síntese, o $\text{Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$ foi adicionado, em temperatura ambiente e sob atmosfera inerte de argônio, a uma solução constituída de ácido nítrico e água deionizada. A proporção utilizada foi de 900 mL de água, 6,5 g de HNO_3 e 74 g do precursor, conforme recomendado na literatura. A mistura foi mantida sob agitação lenta e contínua, permitindo a ocorrência da etapa de peptização. Durante esse estágio, ocorre a formação de flocos brancos, que se desfazem gradualmente até resultar em uma solução translúcida. Esse processo teve duração aproximada de 72 horas, mantido sob agitação constante e sendo conduzido à temperatura ambiente.

A superfície utilizada para a impregnação do material fotocatalítico foi constituída por fibras vegetais de *Luffa cylindrica* (bucha vegetal), previamente cortadas e pesadas, de modo a padronizar a massa em aproximadamente 6,5 g por unidade experimental. Antes da impregnação, as fibras foram submetidas a um processo de limpeza alcalina, realizado com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) preparada na concentração de 2 g por 100 mL, totalizando 1 L de solução. As fibras foram completamente imersas nessa solução por 5 minutos e, em seguida, enxaguadas com água destilada para remover o excesso de NaOH de sua superfície. Após a lavagem foram colocadas para secar em estufa a 40 °C.

Para a impregnação do sol-gel de TiO₂ preparado previamente, as fibras secas foram submersas na solução por 10 minutos, garantindo o recobrimento completo do material. Posteriormente, foram novamente submetidas à secagem em estufa a 40 °C. Esse procedimento foi repetido duas vezes, assegurando maior aderência e uniformidade do fotocatalisador sobre a superfície da fibra. Após a segunda secagem, as fibras foram distribuídas nos frascos destinados ao sistema fotocatalítico, cada um com volume de 800 mL. Foram utilizados quatro frascos, correspondendo às quatro câmaras de armazenamento empregadas no experimento.

A fonte de radiação utilizada para a ativação do TiO₂ foi uma lâmpada UV do tipo luz negra, com potência de 20 W e frequência de 50/60 Hz (Ourolux, Brasil). A intensidade de radiação emitida pelas lâmpadas foi avaliada com auxílio de um Photo/Radiometer (HD 2102.2, Germany), apresentando valor de 3.841 $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Essa intensidade foi considerada adequada para promover a ativação do catalisador e favorecer a degradação fotocatalítica do C₂H₄ gerado pelos frutos durante o armazenamento.

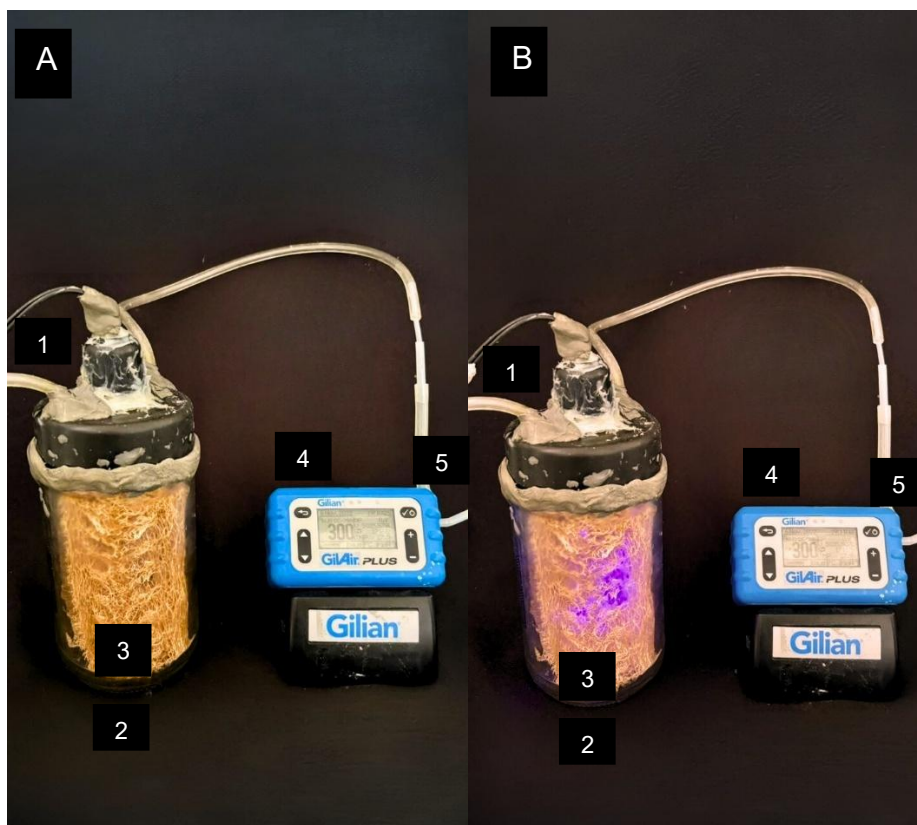


Figura 4: Imagem do sistema de fotocatalise utilizado durante o armazenamento dos frutos em AC com a luz UV apagada (A) e luz UV acesa (B), sistema de fotocatalise ativo). O sistema é composto de: 1) Tubo para condução do gás contido na câmara de armazenamento; 2) Câmara de fotocatalise; 3) Superfície (bucha vegetal) impregnada com TiO_2 ; 4) Bomba de fluxo de ar; 6) Tubo de retorno de gás para a câmara, após eliminação do C_2H_4 pela fotocatalise.

O fotocatalisador utilizado no experimento, ilustrado na Figura 4, foi constituído por diferentes componentes que atuam de forma integrada no processo de remoção do C_2H_4 . O sistema é composto por: 1) um tubo de condução, responsável pelo transporte do ar contendo a mistura gasosa proveniente da câmara de armazenamento; 2) a câmara de fotocatalise, unidade onde ocorre o processo reacional, equipada com a lâmpada UV (Ourolux, Brasil) e com as fibras previamente impregnadas com TiO_2 ; 3) a superfície catalisadora, constituída pela fibra vegetal impregnada com TiO_2 , material no qual ocorre a fotocatalise; 4) a lâmpada ultravioleta, fonte de radiação necessária para a ativação do catalisador; 5) uma bomba de fluxo de ar (Gilair Plus, EUA), ajustada para 300 sscm, responsável por manter o fluxo contínuo e garantir que o ar tratado retorne ao sistema; e 6) o tubo de retorno, que reconduz a mistura gasosa, após a etapa de fotocatalise, para o interior da câmara de armazenamento.

Durante o funcionamento, a mistura gasosa oriunda da câmara de armazenamento é direcionada para a câmara de fotocatalise, onde entra em contato com a superfície catalítica impregnada com TiO_2 sob irradiação UV. Nessa condição, o catalisador é ativado e ocorre a formação de espécies reativas de oxigênio (ROS), que promovem a oxidação do C_2H_4 . A remoção do C_2H_4 da atmosfera de armazenamento contribui para retardar o amadurecimento dos frutos e reduzir o acúmulo desse composto no ambiente interno das câmaras.

4.4. Validação da eficiência do sistema fotocatalítico

A validação da eficiência do sistema fotocatalítico na remoção de C_2H_4 foi realizada por meio de um ensaio controlado, utilizando a técnica de espectroscopia fotoacústica para quantificar a concentração do gás após sua exposição ao ambiente contendo o fotocatalisador, representado na Figura 5.

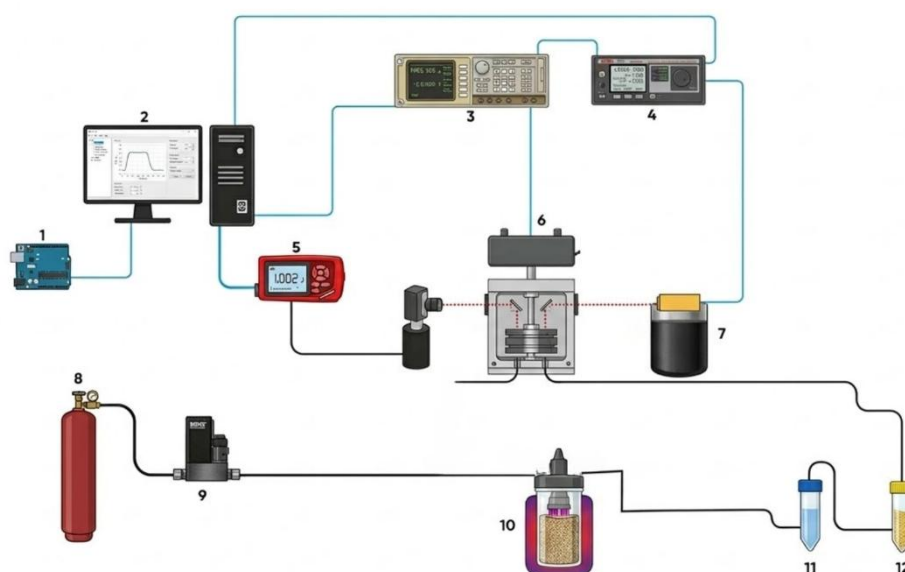


Figura 5: Imagem ilustrativa da montagem experimental com o sistema fotoacústico utilizado para detecção e monitoramento do etileno para a validação da eficiência do sistema fotocatalítico. O sistema é composto por: 1) Microcontrolador; 2) Computador; 3) Amplificador lock-in; 4) Fonte do laser; 5) Medidor de potência; 6) Célula fotoacústica; 7) Laser de cascata quântica; 8) Cilindro de etileno; 9) Fluxômetro; 10) Fotocatalisador; 11) Filtro de hidróxido de potássio; 12) Filtro de cloreto de cálcio. Adaptado de Nunes (2025).

O sistema fotoacústico utilizado no experimento, ilustrado na Figura 5, foi constituído pelos seguintes componentes: 1) microcontrolador (ATMEGA2560, Arduino), responsável por receber e enviar dados aos fluxômetros, processar as

informações e realizar a comunicação com o computador, além de atuar no controle do fluxo gasoso; 2) computador, utilizado para programação, monitoramento, armazenamento e análise dos dados; 3) amplificador *lock-in* SR830 (Stanford Research Systems); 4) fonte do laser ITC4002QCL (THORLABS); 5) medidor de potência S401C (THORLABS); 6) célula fotoacústica diferencial (*homemade*), onde ocorre a detecção da concentração de C_2H_4 residual após o processo de oxidação; 7) laser de cascata quântica D10530HH (THORLABS); 8) cilindro de etileno contendo gás padrão a 100 ppm em ar sintético, adquirido da empresa White Martins; 9) fluxômetro de massa (Brooks 5850S), utilizado para controlar a vazão do gás e garantir a concentração desejada; 10) fotocatalisador em análise, onde ocorre o processo de fotocatalise heterogênea; 11) filtro de hidróxido de potássio (KOH), empregado para minimizar a interferência de CO_2 e 12) filtro de cloreto de cálcio ($CaCl_2$), utilizado para reduzir a interferência da água.

A técnica de espectroscopia fotoacústica baseia-se na conversão da energia luminosa absorvida pelas moléculas do gás em energia acústica, detectada na forma de ondas sonoras por microfones de alta sensibilidade acoplados à célula fotoacústica. O sinal elétrico gerado é processado pelo sistema eletrônico do equipamento, sendo diretamente proporcional à concentração de C_2H_4 na amostra gasosa, o que permite sua detecção com elevada sensibilidade e resposta rápida (Zhang et al., 2023; Wijesinghe et al., 2024).

Para a realização do ensaio, um fluxo contínuo de C_2H_4 , de concentração conhecida (100 ppm) foi conduzido ao interior do reator contendo o fotocatalisador por meio do controlador de fluxo mássico. No interior do sistema, o gás entrou em contato com a superfície catalítica composta por fibra vegetal impregnada com TiO_2 , enquanto a lâmpada UV-A permaneceu ligada, promovendo a ativação do semicondutor e o início do processo de fotocatalise.

Durante o período em que a lâmpada UV-A permaneceu ligada, o TiO_2 ativado promoveu a degradação do C_2H_4 , resultando na redução dos valores do sinal fotoacústico. Em contrapartida, ao desligar a lâmpada UV-A, a degradação fotocatalítica foi interrompida, permitindo o acúmulo do gás (C_2H_4) no interior da câmara. Essas variações na concentração de C_2H_4 , em função da ativação ou não do sistema fotocatalítico, foram monitoradas em tempo real por meio da espectroscopia fotoacústica, conforme sinal apresentado na Figura 6.

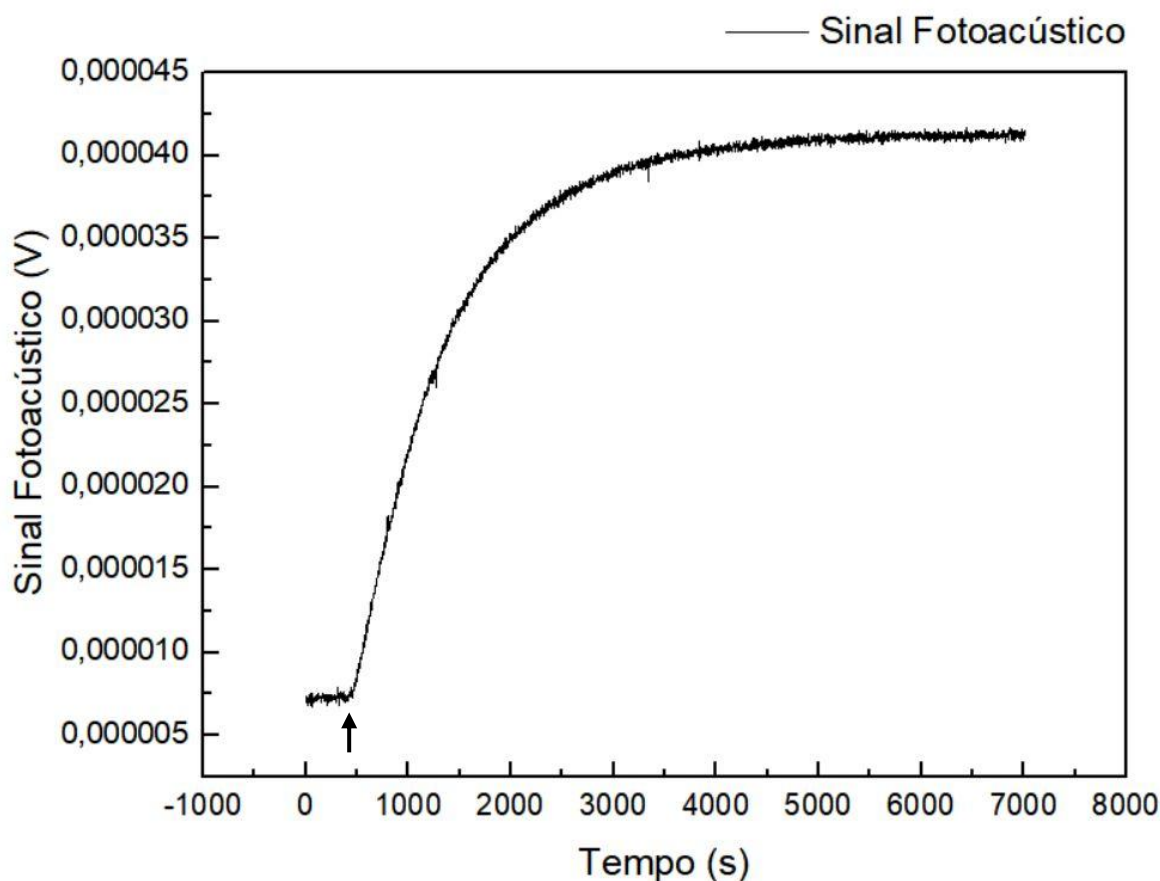


Figura 6: Evolução do sinal fotoacústico de detecção de C_2H_4 em função do tempo durante o ensaio controlado de degradação fotocatalítica do C_2H_4 . O sinal inicial manteve-se baixo enquanto a lâmpada UV-A permaneceu ligada, indicando remoção significativa do C_2H_4 pelo fotocatalisador. Após o desligamento da lâmpada (indicado pela seta), observou-se aumento progressivo do sinal fotoacústico, evidenciando a interrupção do processo fotocatalítico e o acúmulo de C_2H_4 dentro da câmara de fotocatalise. O sinal fotoacústico (V) é proporcional à concentração de C_2H_4 no gás analisado.

No início do ensaio, com a lâmpada UV-A ligada, o sinal fotoacústico manteve-se baixo, próximo de $5 \mu V$, correspondendo a aproximadamente 1 ppm de C_2H_4 , apesar da entrada contínua de gás padrão a 100 ppm, evidenciando a elevada eficiência do sistema na remoção do etileno. Após o desligamento da lâmpada UV-A, observou-se aumento progressivo do sinal fotoacústico, indicando a interrupção do processo fotocatalítico e o acúmulo do gás na câmara. Aproximadamente uma hora após o desligamento, o sinal atingiu valores próximos de $40 \mu V$, correspondentes à concentração inicial de 100 ppm.

Dessa forma, os resultados obtidos confirmam, de maneira direta e controlada, a eficiência do sistema fotocatalítico desenvolvido na degradação do C_2H_4 quando ativado por radiação UV-A.

4.5. Análises de qualidade dos frutos

A caracterização pós-colheita dos frutos foi realizada por meio das avaliações de FF, coloração do epicarpo, AT, teor de SS e PMF. As análises foram conduzidas nos tempos 0, 3, 6, 9 e 12 dias de armazenamento, com três frutos avaliados em cada tempo e para as duas condições experimentais (fotocatalisador ligado e desligado).

A FF foi determinada mediante três medições em pontos equidistantes na região equatorial de cada fruto, sendo utilizados três frutos por tempo de avaliação. Os valores médios foram obtidos a partir das triplicatas registradas. As análises foram realizadas por resistência à penetração utilizando um texturômetro de bancada (Texture Analyser, modelo TA.XT Express, Reino Unido) equipado com ponta de prova de 2 mm de diâmetro. O ensaio consistiu em um deslocamento inicial de 2 mm a partir da superfície da casca, seguido de penetração adicional de 1 mm no mesocarpo, com velocidade de 2 mms^{-1} e força aplicada de 0,1961 N.

A coloração do epicarpo foi determinada por meio de leituras obtidas com um colorímetro portátil (Chroma Meter, modelo CR-400, Minolta). Foram realizadas três leituras em pontos equidistantes da região equatorial de cada fruto, totalizando três frutos analisados por tempo. O valor médio foi utilizado para o cálculo dos parâmetros CIELab: luminosidade (L), coordenadas cromáticas (a e b), croma ($C = \sqrt{a^2 + b^2}$) e ângulo de cor (*hue*). A interpretação dos atributos de cor seguiu a metodologia proposta por McGuire (1992).

O teor de SS foi determinado utilizando um refratômetro digital portátil (HI96801, Hanna), a partir do exsudato da polpa. Para obtenção da amostra, uma porção da polpa central foi coletada com auxílio de uma colher e prensada em gaze, permitindo a separação apenas da parte líquida. Foram obtidas três leituras por fruto, com três frutos analisados em cada tempo de armazenamento. Os resultados foram expressos em graus Brix ($^{\circ}\text{Brix}$).

A AT foi determinada conforme o método da A.O.A.C. (1975), utilizando titulação com solução de NaOH 0,1 N. As análises foram conduzidas com o auxílio de uma bureta de 50 mL e de um pHmetro de bancada (DM-21, Digimed) para monitorar o ponto final de titulação. Devido à coloração avermelhada característica da polpa do mamão, que dificulta a visualização da viragem da fenolftaleína, adotou-se pH 8,2 como referência para o ponto final, considerando a faixa de 8,2 a 8,3. Para cada determinação, 15 g de polpa foram transferidos para um Becker de

200 mL, sendo o volume ajustado para 50 mL com água deionizada, seguido de homogeneização em mixer, visando à obtenção de uma amostra uniforme para análise.

O RT foi calculado pela razão entre o SS e a AT, utilizando-se os valores médios obtidos para cada tratamento e tempo de avaliação.

A PMF foi avaliada por meio de pesagens realizadas no início do experimento (tempo 0) e nos dias 3, 6, 9 e 12 de armazenamento. As medições foram feitas em balança semianalítica, utilizando-se todos os frutos destinados a cada tempo experimental. A perda de MF foi expressa como porcentagem da massa inicial.

4.6. Taxa respiratória e taxa de emissão de etileno

A taxa respiratória (TR) e a taxa de emissão de etileno (EmEt) dos frutos foram determinadas a partir da quantificação dos gases CO_2 e C_2H_4 liberados pelos frutos inteiros, por meio de cromatografia gasosa.

As análises foram realizadas em um cromatógrafo a gás equipado com *loop* de injeção de 1 mL, coluna empacotada Porapak Q, detector de ionização em chama (FID) para a detecção de C_2H_4 e detector de condutividade térmica (TCD) para a quantificação de CO_2 . As condições operacionais do equipamento foram mantidas conforme especificado: pressão de injeção de 140 kPa e temperaturas de 100 °C no forno, 200 °C no injetor e 300 °C no detector.

As medições foram realizadas aos 3, 6, 9 e 12 dias de armazenamento. Durante o período experimental, os frutos permaneceram acondicionados em câmaras de armazenamento constituídas por dessecadores com volume de 7 L, contendo três frutos por unidade experimental. Parte do volume interno das câmaras foi preenchida com esferas de vidro, com o objetivo de reduzir o espaço livre e otimizar a concentração dos gases para amostragem.

O sistema operou sob fluxo contínuo de ar, com ajuste da vazão ao longo do armazenamento. No terceiro dia foi adotado fluxo de 75 sccm. A partir da abertura do sistema, o fluxo foi redistribuído entre as câmaras, sendo ajustado para aproximadamente 100 sccm, posteriormente para 150 sccm e, por fim, atingindo 300 sccm na última câmara.

Para a coleta das amostras gasosas, foi retirado um volume de 1 mL da atmosfera interna de cada câmara, utilizando seringa do tipo Gastight (Hamilton,

EUA), assegurando precisão e estanqueidade durante a amostragem. As amostras foram imediatamente injetadas no cromatógrafo a gás para determinação das concentrações de CO₂ e C₂H₄.

Os valores de CO₂ foram utilizados para o cálculo da taxa respiratória (TR), enquanto as concentrações de C₂H₄ foram empregadas para a determinação da taxa de emissão de etileno (EmEt).

As taxas foram calculadas de acordo com a equação 01.

$$\text{TR ou EmEt} = \frac{(\Delta\% \times \text{fluxo de ar (mL min}^{-1}) \times 60)}{1000 \times \text{massa dos frutos armazenados (kg)}} \quad \text{Eq 01}$$

Em que Δ% corresponde à concentração do gás (CO₂ ou C₂H₄), obtida a partir da área do pico gerado pela cromatografia gasosa, sendo esses valores convertidos em concentração por meio de curva de calibração previamente estabelecida. O fluxo de ar utilizado no sistema variou ao longo do armazenamento, sendo de 75 sccm no terceiro dia, 100 sccm no sexto dia, 150 sccm no nono dia e 300 sccm no décimo segundo dia. Para aplicação na Equação 1, essas vazões foram consideradas em mL·min⁻¹, unidade requerida no cálculo, uma vez que valores expressos em sccm são numericamente equivalentes a mL·min⁻¹ em condições padrão de temperatura e pressão.

4.7. Análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial composto por dois tratamentos (fotocatalisador ligado e desligado) e até cinco tempos de armazenamento (0, 3, 6, 9 e 12 dias). Todas as variáveis avaliadas foram analisadas em triplicata. Os dados foram inicialmente registrados em arquivos do tipo .txt e, posteriormente exportados para o software OriginLab, utilizado para a organização e a construção dos gráficos referentes à evolução das variáveis ao longo do armazenamento.

Para cada variável (FF, coloração da casca, AT, teor de SS, RT, PMF, TR e a taxa de EmEt) foram plotados os valores médios em função do tempo, permitindo a comparação entre os tratamentos.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com dois tratamentos. Os dados foram submetidos ao teste t de Student para comparação das médias entre os tratamentos, adotando-se o nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$). Os resultados foram expressos como média \pm erro padrão da média.

Adicionalmente, foi realizada análise de regressão com o objetivo de avaliar a variação das variáveis em função do tempo de armazenamento e do tratamento. O tempo foi considerado como variável independente, e os modelos foram ajustados incluindo os fatores tempo, tratamento e, quando pertinente, a interação entre esses fatores.

Foram obtidas as estimativas dos coeficientes dos modelos, acompanhadas de seus respectivos erros padrão e valores de p, bem como o coeficiente de determinação (R^2), utilizado para avaliar a qualidade do ajuste. A significância dos efeitos foi interpretada com base nos níveis de probabilidade (* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$).

Para a maioria das variáveis, foi considerado o modelo completo, incluindo a interação entre tempo e tratamento, conforme descrito a seguir:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 T_i + \beta_2 A_j + \beta_3 (T_i \times A_j) + \varepsilon_{ij}$$

em que Y_{ij} representa a variável resposta, β_0 o intercepto, β_1 o efeito do tempo de armazenamento (T_i), β_2 o efeito do tratamento (A_j), β_3 a interação entre tempo e tratamento, e ε_{ij} o erro aleatório associado às observações.

Para algumas variáveis, nas quais a interação não foi considerada ou não apresentou contribuição relevante para o ajuste do modelo, foi adotado o modelo reduzido:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1 T_i + \beta_2 A_j + \varepsilon_{ij}$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização da aparência dos frutos

Neste estudo foram utilizados 15 frutos por tratamento, sendo aplicados dois tratamentos experimentais, a saber: armazenamento de frutos em AC sem fotocatalise (AC) e armazenamento de frutos em AC com fotocatalise (ACF). Cada tratamento foi conduzido com três repetições, sendo os frutos considerados representativos de uma população infinita, conforme os pressupostos experimentais adotados para a avaliação das principais características de qualidade física e química dos frutos.

A caracterização da aparência dos frutos é um parâmetro relevante em estudos pós-colheita, pois alterações na aparência do fruto, como mudança de coloração, presença de injúrias e incidência de patógenos, estão diretamente relacionadas à aceitação comercial e frequentemente antecedem mudanças mensuráveis em parâmetros instrumentais (Batista et al., 2019).

A Figura 7 ilustra um lote de frutos no momento da chegada no Laboratório para o início de um ensaio (tempo 0). Observa-se que os frutos se encontravam predominantemente no estágio de maturação verde-maduro, embora alguns apresentassem áreas iniciais de coloração amarelada no epicarpo. Essa variação inicial no estágio de maturação é comum em lotes comerciais e foi considerada na interpretação dos resultados ao longo do armazenamento. Também foram observados pequenos pontos de mancha fisiológica na face dos frutos exposta à radiação solar ainda no campo, distúrbio previamente também relatado por Martins e Resende (2013).



Figura 7: Imagem ilustrativa dos frutos de mamão 'Aliança' no tempo 0, após a chegada ao laboratório.

Após três dias de armazenamento, a aparência dos frutos (Figura 8) evidenciou a predominância de coloração verde na casca, principalmente na região proximal, próxima ao pedúnculo. Nesse período, a comparação entre os tratamentos AC e ACF indicou poucas diferenças perceptíveis quanto à coloração, sugerindo que, nos primeiros dias, o amadurecimento ainda ocorre de forma discreta, mesmo sob diferentes condições de armazenamento. Esse comportamento é esperado, uma vez que as alterações externas tendem a se intensificar à medida que o fruto avança no processo de amadurecimento. Estudos como o de Fonseca et al. (2003) e Martins et al. (2015) com mamão armazenado sob AC também indicam que as mudanças de aparência se tornam mais evidentes com o prolongamento do armazenamento, a partir de aproximadamente sete dias, variando conforme as concentrações de O_2 e CO_2 .



Figura 8: Imagem ilustrativa dos frutos de mamão 'Aliança' após três dias de armazenamento em AC e ACF.

Após seis dias de armazenamento, foi possível observar diferenças de aparência entre os tratamentos (Figura 9). Os frutos armazenados sob AC apresentaram coloração da casca mais amarelada em comparação aos frutos sob ACF, sugerindo que a fotocatalise contribuiu para retardar o avanço do amadurecimento visual. Esse efeito é coerente com o papel do C_2H_4 na regulação do amadurecimento do mamão e com estudos que demonstram que a redução do metabolismo respiratório e da produção de C_2H_4 , por meio do controle da atmosfera, contribui para o atraso das mudanças de cor (Martins et al., 2014; Martins et al., 2015).



Figura 9: Imagem ilustrativa dos frutos de mamão 'Aliança' após seis dias de armazenamento em AC e ACF.

O efeito da fotocatalise tornou-se mais evidente aos nove dias de armazenamento (Figura 10). Os frutos mantidos em AC apresentaram coloração amarela mais intensa, enquanto os frutos sob ACF mantiveram coloração menos avançada. Esse resultado reforça que técnicas de remoção de C_2H_4 podem atuar como estratégia complementar a AC, reduzindo o estímulo hormonal do amadurecimento e retardando alterações associadas à coloração e firmeza do fruto (Pathak et al., 2017). Além disso, estudos em mamão armazenado sob atmosfera controlada relatam que combinações com baixo O_2 e níveis moderados de CO_2 são capazes de retardar o amadurecimento e preservar atributos externos, corroborando o padrão observado neste trabalho (Fonseca et al., 2003; Martins et al., 2015).



Figura 10: Imagem fotográfica dos frutos de mamão 'Aliança' após nove dias de armazenamento em AC e ACF.

Ao final do período de armazenamento (12 dias), as diferenças de aparência entre os tratamentos permaneceram consistentes (Figura 11). Frutos armazenados sob AC apresentaram maior avanço no amarelecimento da casca, enquanto os frutos sob ACF mantiveram coloração menos intensa, indicando atraso no amadurecimento. Esses resultados são compatíveis com estudos realizados com mamão sob atmosfera controlada, nos quais o controle do ambiente gasoso contribui para prolongar a vida útil do fruto (Martins et al., 2015; Oliveira e Filho, 2021).



Figura 11: Imagem fotográfica dos frutos de mamão 'Aliança' após doze dias de armazenamento em AC e ACF.

A Figura 12 mostra frutos com incidência de esporulação fúngica principalmente nos pedúnculos. A partir do sexto dia de armazenamento, foi registrado o aparecimento de fungos no pedúnculo dos frutos, fenômeno também relatado por Martins e Resende (2013). Esse comportamento pode estar relacionado à alta umidade, de aproximadamente 90%, dentro das câmaras de armazenamento, o que favorece a colonização de determinados patógenos, explicado por Martins e Resende (2013). Adicionalmente, a baixa concentração de O_2 pode contribuir para a inativação de alguns microrganismos e, simultaneamente, favorecer o desenvolvimento de outros, especialmente em regiões com injúrias

preexistentes, alterando significativamente o controle biológico existente em condições ambiente (Lane, 2023).



Figura 12: Imagem ilustrativa do crescimento fúngico observado nos pedúnculos, durante o armazenamento dos frutos de mamão 'Aliança' em AC.

Com o objetivo de minimizar a incidência de doenças pedunculares, a partir do segundo ensaio experimental dos seis realizados, os frutos foram submetidos a tratamento hidrotérmico, conforme metodologia descrita por Magolin et al. (2018). O procedimento consistiu na imersão da região peduncular dos frutos em água a 70 °C por 15 segundos, utilizando para isso um banho térmico. Após a aplicação do tratamento, observou-se redução significativa na incidência de crescimento fúngico nos pedúnculos.

5.2. Análises físicas e químicas nos frutos

Durante o armazenamento verificou-se uma crescente PMF dos frutos, independente do uso ou não do fotocatalisador (Figura 13). Os frutos armazenados em AC apresentaram maiores valores de PMF, atingindo aproximadamente 6,1% ao final de 12 dias de armazenamento. Por outro lado, os frutos mantidos sob ACF exibiram tendência de menor perda de massa fresca, com valores em torno de 3,8% no mesmo período.

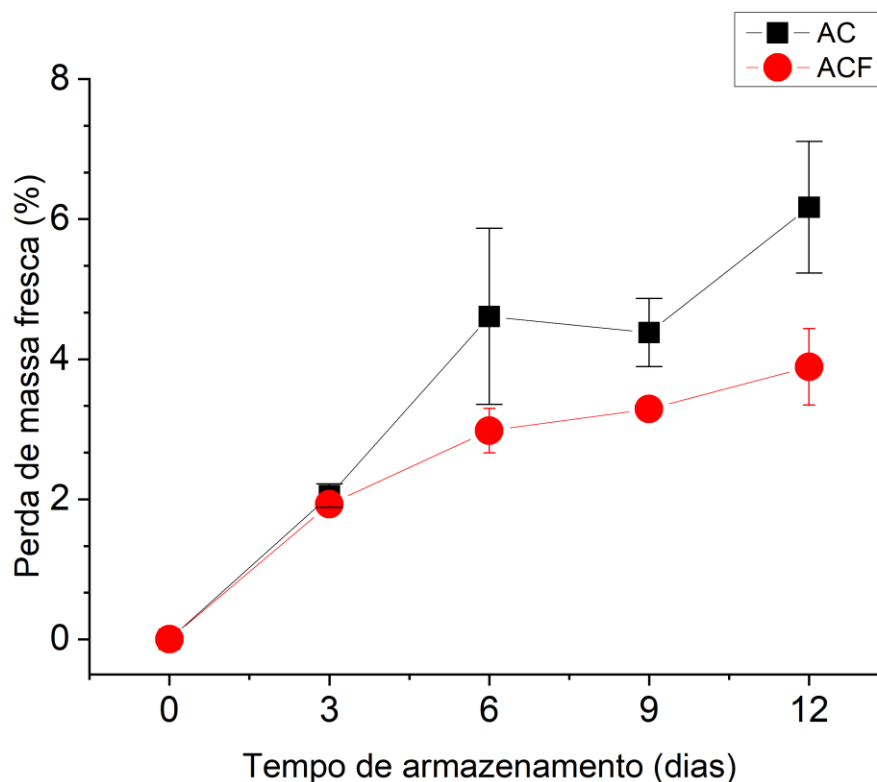


Figura 13: Perda de massa fresca (PMF) do mamão 'Aliança' armazenado por 0, 3, 6, 9 e 12 dias sob AC e ACF a 25 °C. Os valores representam a média de 3 repetições e a barra o erro padrão. * Médias diferem estatisticamente entre si pelo teste *t* de Student, em nível de 5% de probabilidade.

Não foram detectadas diferenças estatisticamente significativas na PMF entre AC e ACF ao longo do armazenamento. Essa tendência pode estar associada à variabilidade intrínseca dos frutos, uma vez que os ensaios foram conduzidos de forma independente e com colheitas realizadas em meses distintos, o que pode influenciar nas características fisiológicas.

A PMF em frutos climatéricos está diretamente relacionada à respiração e à transpiração (Ali et al., 2004). Durante o armazenamento, ocorre conversão metabólica de açúcares em CO_2 e H_2O , associada à transpiração e evaporação de vapor d'água direto pela casca, resultando em redução da massa do fruto. (Reitz e Mitcham, 2023).

Entre os parâmetros de cor analisados, o ângulo *hue* da casca dos frutos apresentou redução no período de armazenamento em ambos os tratamentos (Figura 14), o que indica uma progressão natural do processo de amadurecimento, caracterizada pela transição da coloração verde para tons amarelados. Valores

mais elevados de ângulo *hue* estão associados à predominância de clorofila, enquanto a redução desse parâmetro reflete a degradação da clorofila e a síntese ou exposição de carotenoides, típicos do processo de amadurecimento do mamão.

Os frutos armazenados em AC apresentaram queda mais acentuada do ângulo *hue* durante o armazenamento, atingindo valores próximos a 96 no nono dia, o que indica avanço mais rápido do amarelecimento da casca pelo amadurecimento do fruto (Figura 14). Em contraste, os frutos submetidos a ACF mantiveram valores significativamente mais elevados de ângulo *hue* em diversos tempos de armazenamento, evidenciando maior retenção da coloração verde e atraso no processo de amadurecimento do fruto.

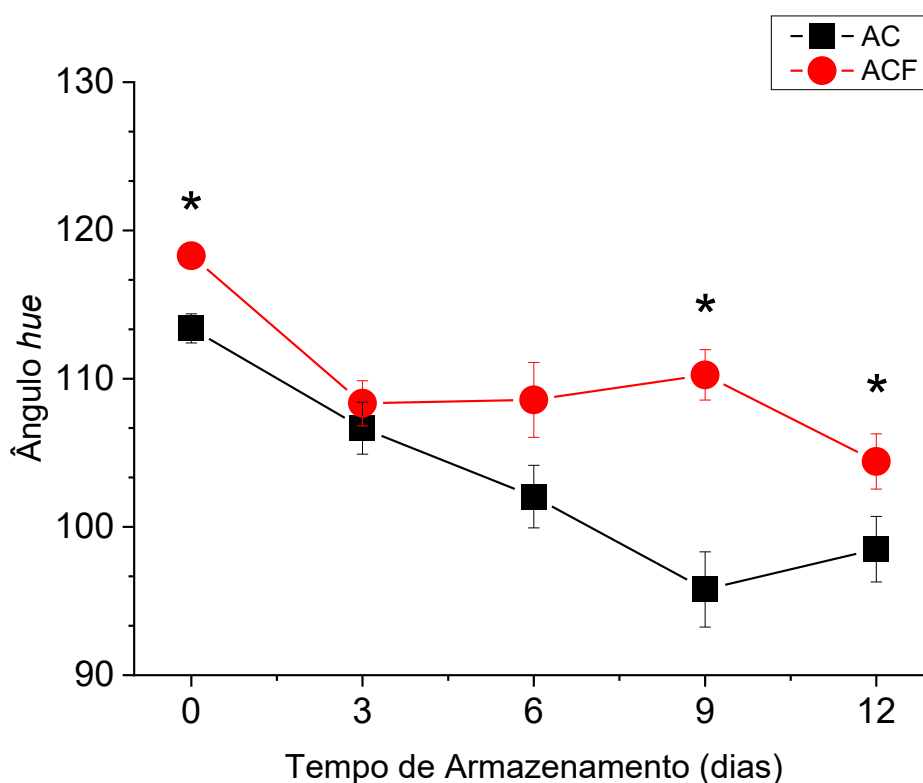


Figura 14: Ângulo *hue* da casca de frutos de mamão 'Aliança' armazenados por 0, 3, 6, 9 e 12 dias sob AC e ACF a 25 °C. Os valores representam a média de 3 repetições e a barra o erro padrão. * Médias diferem estatisticamente entre si pelo teste *t* de Student, em nível de 5% de probabilidade.

Diferenças ($p < 0,05$) no ângulo *hue* entre os tratamentos foram observadas no tempo inicial (dia 0) e no 9º e 12º dia de armazenamento, conforme indicado na Figura 10. A manutenção de valores mais elevados de ângulo *hue* nos frutos armazenados sob ACF sugere que a remoção do C_2H_4 por meio da fotocatalise

contribuiu para retardar a degradação da clorofila e a mudança na coloração da casca do mamão $p < 0,05$. Esse efeito está diretamente relacionado ao papel do C_2H_4 na regulação do amadurecimento de frutos climatéricos, como o mamão, especialmente nos processos de desverdecimento e síntese de pigmentos carotenoides (Fabi e Prado, 2019).

A redução da concentração de C_2H_4 no ambiente de armazenamento pode retardar a ativação de enzimas envolvidas na degradação da clorofila, como a clorofilase e a feoforbide a oxigenase, prolongando o estágio verde-maduro dos frutos (Yang e Hoffman, 1984; Watkins, 2006).

Em relação à luminosidade da casca (L^*) dos frutos de mamão 'Aliança', houve um aumento ao longo do período de armazenamento em ambos os tratamentos, refletindo alterações de aparência associadas ao amadurecimento e à composição de pigmentos na casca (Figura 15). Valores crescentes de L^* estão relacionados ao clareamento da superfície do fruto, decorrente da perda de pigmentação verde e de mudanças na estrutura celular que aumentam a reflectância da casca (Shen et al., 2019).

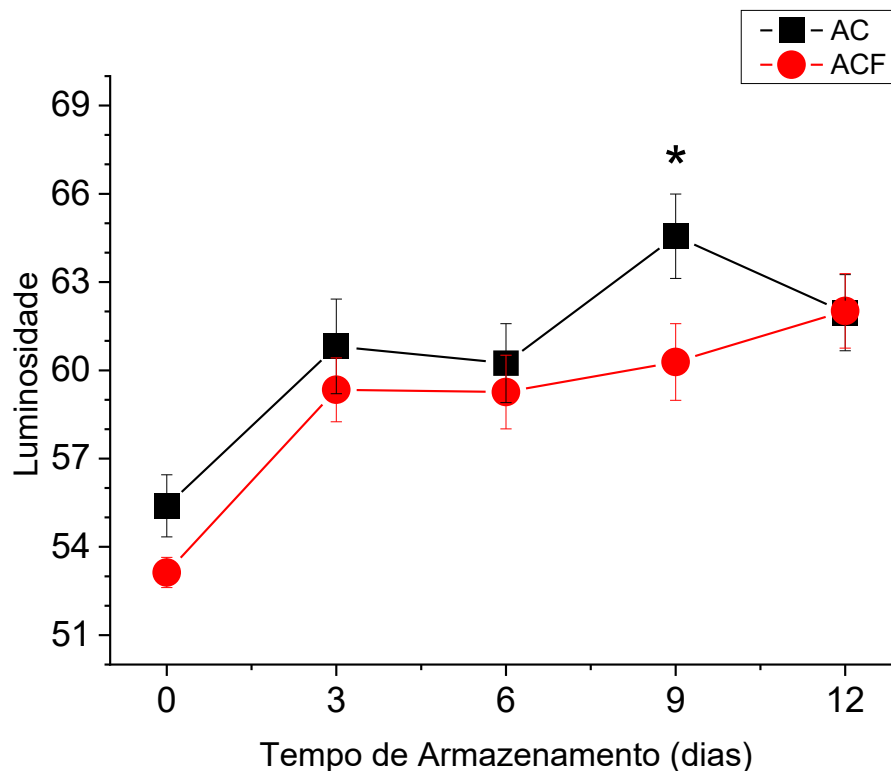


Figura 15: Luminosidade (L^*) da casca de frutos de mamão 'Aliança' armazenados por 0, 3, 6, 9 e 12 dias sob AC e ACF a 25 °C. Os valores representam a média de 3 repetições e a barra o erro padrão. * Médias diferem estatisticamente entre si pelo teste t de Student, em nível de 5% de probabilidade.

Os frutos armazenados em AC apresentaram valores de luminosidade maiores que os frutos submetidos a ACF apenas no dia 9. Esse padrão indica avanço mais pronunciado do clareamento da casca nos frutos em AC, enquanto a fotocatalise associada a AC parece atrasar essas alterações de cor.

O aumento do L^* está associado à degradação das ceras presentes na casca do fruto, o que eleva a reflectância superficial e, conseqüentemente, os valores de L^* (Wu et al., 2023). A redução da concentração de C_2H_4 no ambiente de armazenamento, promovida pela fotocatalise, pode ter limitado a intensidade dessas alterações, contribuindo para a preservação da coloração característica do estágio verde-maduro por período mais prolongado.

O parâmetro de cor C^* da casca dos frutos de mamão 'Aliança' aumentou ao longo do período de armazenamento em ambos os tratamentos (Figura 16), indicando intensificação da saturação da cor. Valores mais elevados de C^* refletem cores mais vivas e intensas, geralmente associadas ao avanço do amadurecimento e à substituição gradual das clorofilas por pigmentos carotenoides na casca.

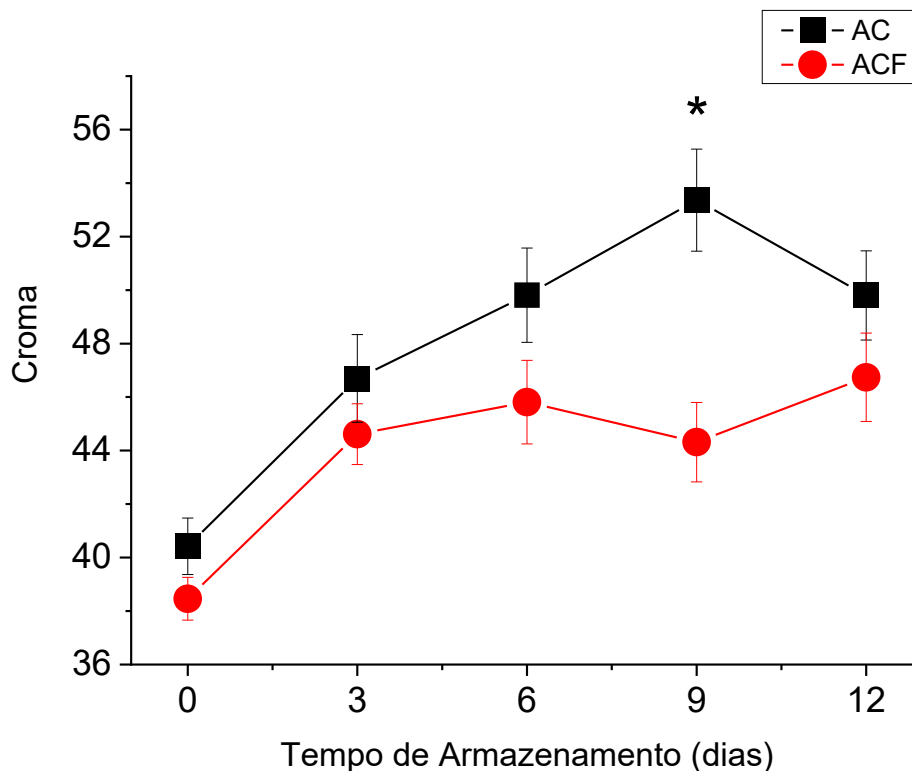


Figura 16: Cromo (C^*) da casca de frutos de mamão 'Aliança' armazenados por 0, 3, 6, 9 e 12 dias sob AC e ACF a 25 °C. Os valores representam a média de 3 repetições e a barra o erro padrão. * Médias diferem estatisticamente entre si pelo teste t de Student, em nível de 5% de probabilidade.

Os frutos armazenados em AC e ACF diferiram estatisticamente em relação ao índice de cor Cromo no nono dia de armazenamento. Esse padrão indica que os frutos armazenados em AC apresentaram maior intensificação da coloração amarela da casca no nono dia do armazenamento, enquanto os frutos submetidos a ACF apresentaram coloração menos saturada, refletida por valores inferiores de C^* . No entanto, a ausência de diferenças estatisticamente consistentes entre os tratamentos sugere que essa variação pode estar associada ao tamanho amostral, que não permitiu uma boa identificação das diferenças do material avaliado, uma vez que os frutos foram provenientes de colheitas realizadas em momentos distintos a cada repetição experimental, o que pode influenciar o estágio fisiológico inicial, a síntese de pigmentos e a evolução da coloração durante o armazenamento (Bron e Jacomino, 2006).

O parâmetro ΔE representa a variação global de cor em relação à condição inicial, integrando em um único valor as variações de luminosidade e cromaticidade. O aumento de ΔE ao longo do armazenamento indica alterações de cor progressivas associadas ao amadurecimento dos frutos, sendo um indicador

sensível da mudança de cor devido à degradação das clorofilas e síntese dos carotenoides refletindo o avanço do amarelecimento da casca (McGuire, 1992).

O ΔE dos frutos aumentou progressivamente durante o armazenamento em ambos os tratamentos, indicando alterações de cor acumulativas na casca do mamão durante o amadurecimento (Figura 17). Os frutos armazenados em AC apresentaram valores de ΔE significativamente mais elevados em comparação aos frutos submetidos a ACF, especialmente a partir do terceiro dia de armazenamento. Esse padrão evidencia mudanças na coloração da casca nos frutos amadurecendo quando armazenados sob AC. Podendo-se considerar a análise de cor como a variável mais representativa ao longo do período de armazenamento.

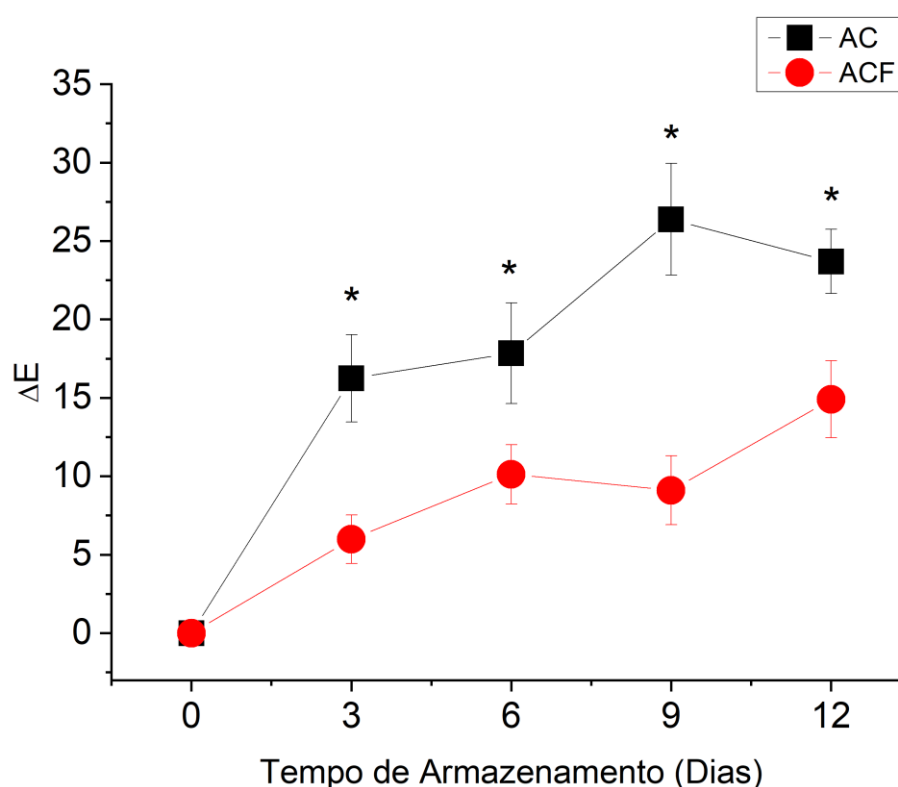


Figura 17: Diferença global de cor (ΔE) da casca de frutos de mamão 'Aliança' armazenados por 0, 3, 6, 9 e 12 dias sob AC e ACF a 25 °C. Os valores representam a média de 3 repetições e a barra o erro padrão. * Médias diferem estatisticamente entre si pelo teste *t* de Student, em nível de 5% de probabilidade.

Mudanças em ΔE estão associadas à degradação das clorofilas e ao aumento relativo de pigmentos carotenoides, responsáveis pela intensificação da coloração amarela característica do amadurecimento do mamão. A menor magnitude de ΔE observada nos frutos sob ACF indica mudanças menos intensas

na coloração do fruto, ou seja, manutenção mais próxima da coloração inicial, sugerindo atraso no amadurecimento do fruto.

A atuação da fotocatalise na redução da concentração de C_2H_4 no ambiente de armazenamento pode ter contribuído para modular esse processo, uma vez que o C_2H_4 exerce papel central na regulação das enzimas envolvidas na degradação das clorofilas e na biossíntese dos carotenoides. Em mamão, a evolução da cor da casca está fortemente associada à atividade do C_2H_4 , sendo o ΔE um parâmetro sensível para detectar essas mudanças durante o amadurecimento (McGuire, 1992).

A FF apresentou padrão claramente distinto entre os tratamentos ao longo do armazenamento (Figura 18). Nos frutos armazenados em AC, observou-se uma redução significativa já aos três dias, indicando amolecimento e avanço do amadurecimento. Em contraste, os frutos armazenados em ACF mantiveram valores de FF mais elevados e relativamente estáveis ao longo de todo o período experimental, sem tendência consistente de redução entre o início e o final do armazenamento, considerando a variação expressa pelas barras de erro.

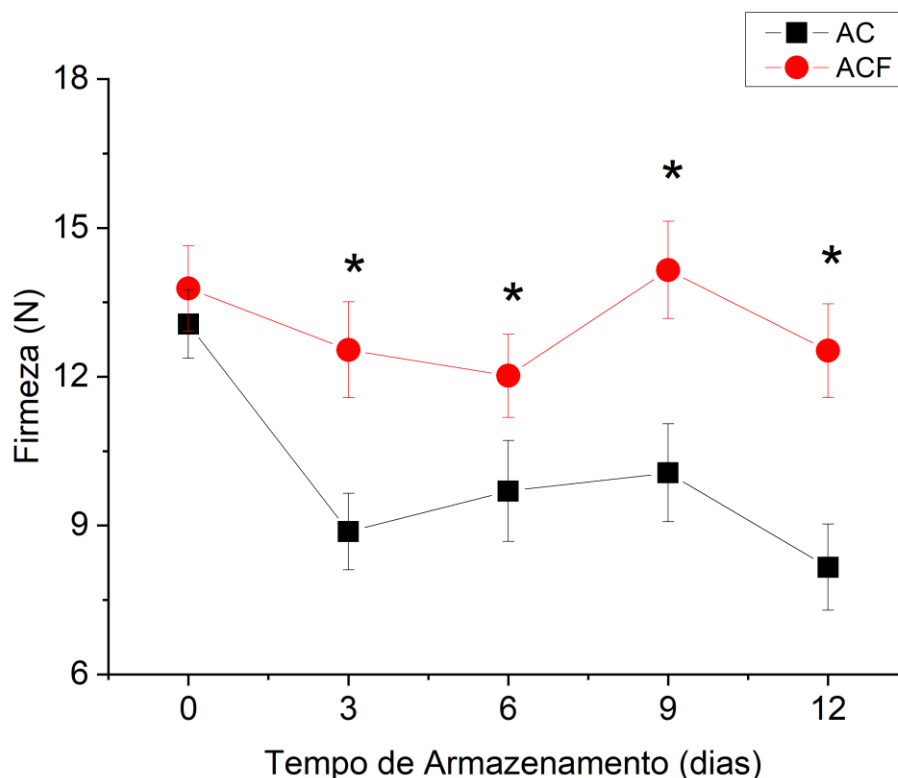


Figura 18: Firmeza do fruto (FF) de mamão 'Aliança' armazenado por 0, 3, 6, 9 e 12 dias sob AC e ACF a 25 °C. Os valores representam a média de 3 repetições e a barra o erro padrão. * Médias diferem estatisticamente entre si pelo teste *t* de Student, em nível de 5% de probabilidade.

Nos frutos armazenados em AC, observou-se queda acentuada da FF aos três dias de armazenamento, indicando amolecimento mais rápido da polpa. Em contraste, os frutos submetidos a ACF apresentaram menor perda de FF, mantendo valores mais elevados até o final do armazenamento, o que sugere atraso no amolecimento da polpa quando o sistema de fotocatalise foi empregado.

O amolecimento da polpa durante o armazenamento resulta de uma série de alterações coordenadas na parede celular, incluindo a solubilização e despolimerização de pectinas, a modificação de hemiceluloses e a perda de adesão entre as células, processos mediados por enzimas como poligalacturonase, pectinametilesterase e β -galactosidase (Ali et al., 2004). Em frutos climatéricos, esses eventos são fortemente regulados pelo C_2H_4 , que atua como sinalizador chave do amadurecimento (Kumar et al., 2018; Soares et al, 2021).

Nesse contexto, a maior manutenção da FF observada nos frutos armazenados sob ACF pode estar associada à redução da concentração de C_2H_4 no ambiente de armazenamento promovida pela fotocatalise, atrasando a ativação das enzimas responsáveis pela degradação da parede celular. Resultados

semelhantes foram relatados em estudos com mamão, onde estratégias de manejo do C_2H_4 contribuíram para a manutenção da firmeza e o prolongamento da vida pós-colheita (Martins, 2005; Zhu et al., 2023).

O teor de SS variou ao longo do período de armazenamento, apresentando um comportamento semelhante em ambos os tratamentos (Figura 19).

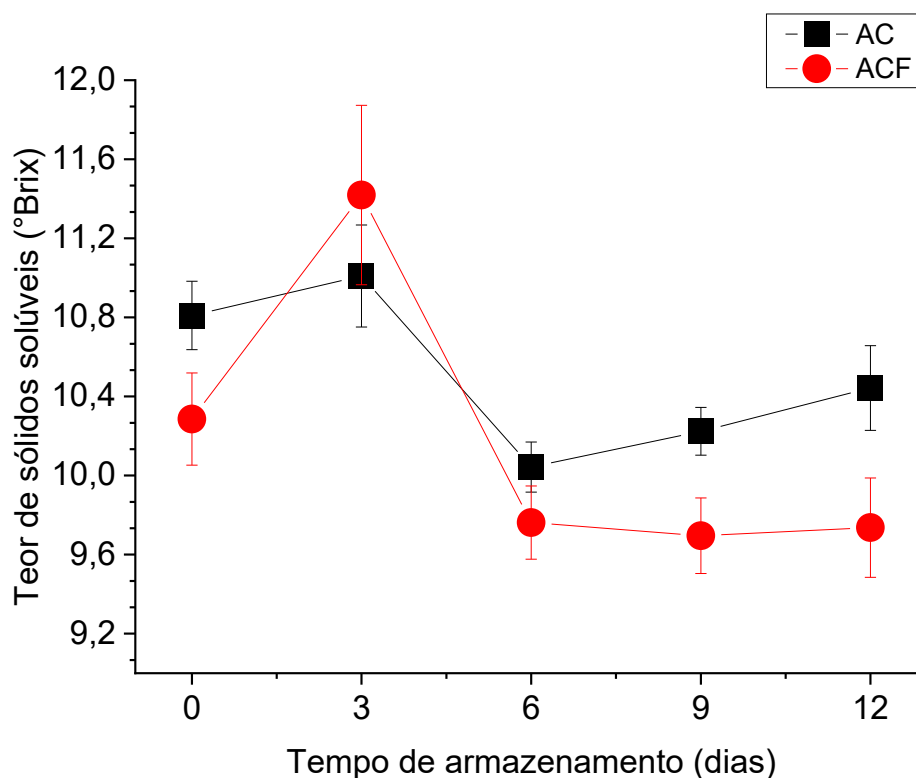


Figura 19: Teor de sólidos solúveis (SS) em °Brix de mamão 'Aliança' armazenado por 0, 3, 6, 9 e 12 dias sob AC e ACF a 25 °C. Os valores representam a média de 3 repetições e a barra o erro padrão. * Médias diferem estatisticamente entre si pelo teste *t* de Student, em nível de 5% de probabilidade.

Embora em alguns pontos os frutos armazenados sob ACF tenham apresentado valores numericamente inferiores aos de AC, não se verifica um padrão consistente que indique efeito direto da fotocatalise sobre essa variável. De modo geral, a dinâmica observada pode estar relacionada ao amadurecimento e ao consumo de carboidratos solúveis como substrato respiratório ao longo do armazenamento, processo característico de frutos climatéricos (Watkins, 2006; Reitz e Mitcham, 2023).

Além disso, houve uma tendência de redução do teor de SS a partir do sexto dia de armazenamento, que pode estar associada à perda de integridade das membranas celulares, favorecendo o extravasamento do conteúdo intracelular e a

diluição dos sólidos solúveis, conforme descrito para frutos tropicais durante o armazenamento prolongado (Vinod et al., 2024).

A AT da polpa dos frutos não apresentou variações significativas ao longo do período de armazenamento, com padrão semelhante entre os tratamentos (Figura 20).

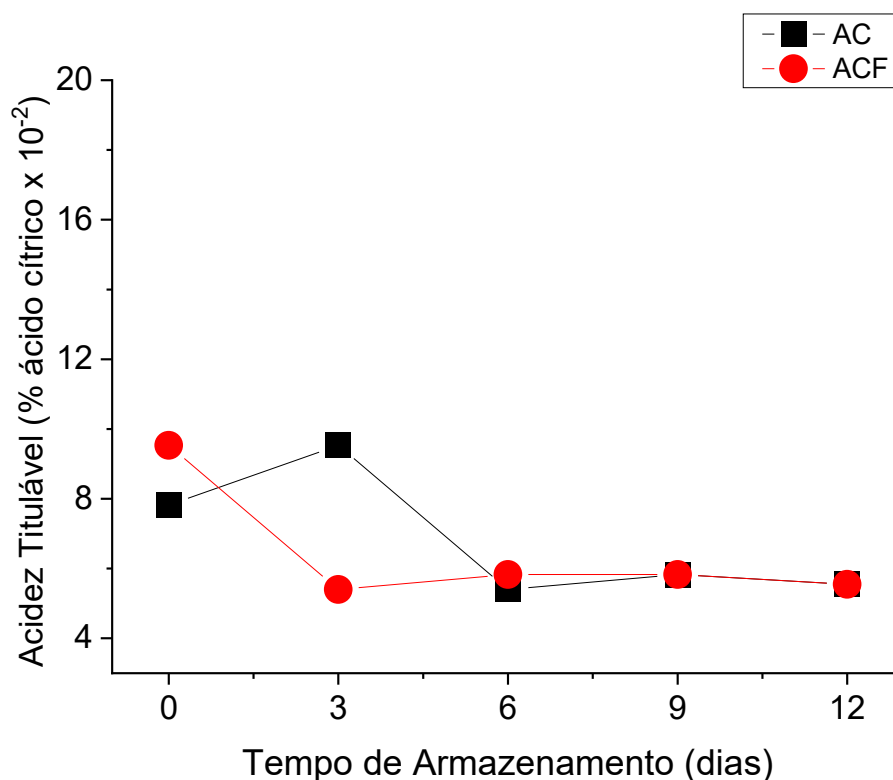


Figura 20: Ácidez Titulável (AT) de mamão 'Aliança' expresso em % de ácido cítrico, armazenado por 0, 3, 6, 9 e 12 dias sob AC e ACF a 25 °C. Os valores representam a média de 3 repetições e a barra o erro padrão. * Médias diferem estatisticamente entre si pelo teste *t* de Student, em nível de 5% de probabilidade.

De modo geral, os resultados indicam que não ocorreram alterações expressivas e contínuas na AT da polpa ao longo do amadurecimento, padrão frequentemente relatado para o mamão. Segundo Galon et al. (2022), a AT do mamão tende a permanecer relativamente constante durante o amadurecimento, apresentando valores médios próximos a 0,09% em frutos mantidos à temperatura ambiente, o que reforça a baixa sensibilidade desse parâmetro às condições de armazenamento.

De acordo com Kuwar et al. (2015), durante o amadurecimento pode ocorrer inicialmente um aumento na acidez, acompanhado de diminuição gradual do pH, em função da síntese de ácidos orgânicos derivados da degradação estrutural dos

tecidos. Em estádios mais avançados, observa-se declínio ou estabilização da AT devido à conversão desses ácidos e açúcares e sua posterior utilização no metabolismo respiratório.

O RT, relação entre sólidos solúveis e acidez titulável (SS/AT), não apresentou variação significativa ao longo do período de armazenamento, e não houve diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos AC e ACF (Figura 21).

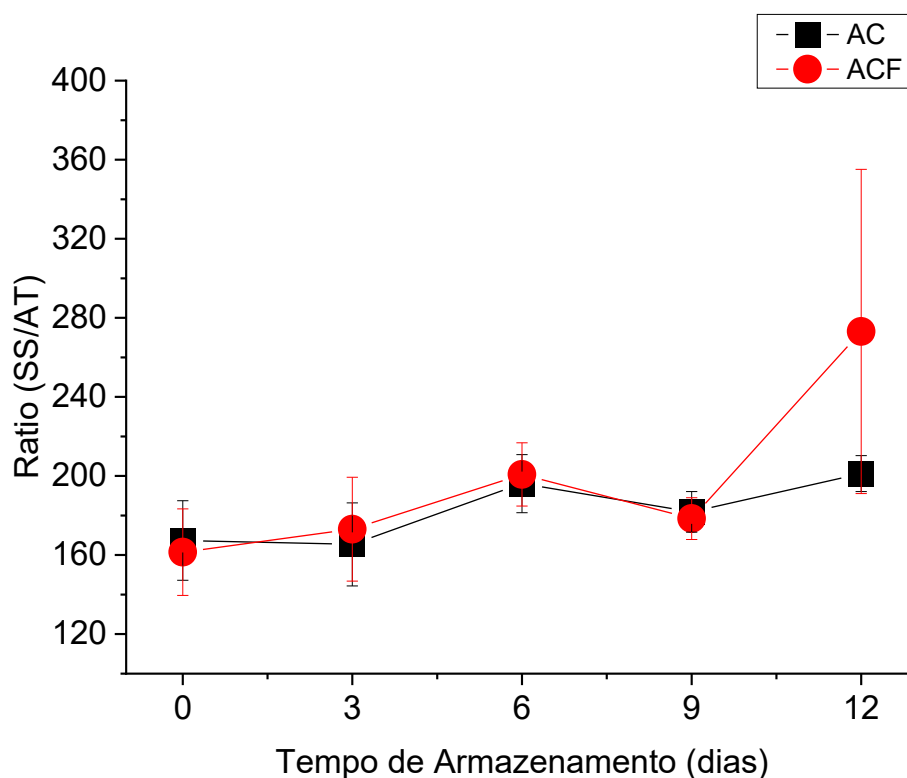


Figura 21: Ratio (SS/AT) de mamão 'Aliança' armazenado por 0, 3, 6, 9 e 12 dias sob AC e ACF a 25 °C. Os valores representam a média de 3 repetições e a barra o erro padrão. * Médias diferem estatisticamente entre si pelo teste *t* de Student, em nível de 5% de probabilidade.

De forma geral, observou-se que não houve aumento da razão SS/AT ao longo do tempo de armazenamento. Como a relação SS/AT é frequentemente utilizada como indicativo do equilíbrio entre doçura e acidez e, conseqüentemente, da aceitabilidade sensorial do fruto, esse aumento pode estar associado ao avanço do amadurecimento e à utilização gradual de ácidos orgânicos no metabolismo respiratório, o que reduz a acidez e eleva essa razão (Carvalho et al., 2020). Embora o tratamento ACF tenha apresentado valores numericamente superiores

no último tempo avaliado, a ausência de diferença significativa indica que a fotocatalise não promoveu alterações consistentes nesse parâmetro, sugerindo que, nas condições experimentais adotadas, a relação SS/AT foi influenciada principalmente pela evolução natural do amadurecimento durante o armazenamento, independente do uso do fotocatalisador.

Para avaliar as alterações das variáveis de qualidade do fruto ao longo do tempo de armazenamento, foi realizada análise de regressão. No entanto, os modelos testados não apresentaram ajuste significativo, indicando que a variação das variáveis não seguiu um padrão linear ao longo do período experimental. Esse resultado pode ser explicado pela natureza fisiológica do amadurecimento de frutos climatéricos, que geralmente apresenta comportamento não linear.

Dessa forma, optou-se por interpretar os resultados com base na comparação das médias ao longo dos tempos de armazenamento, associando as tendências observadas aos processos fisiológicos do amadurecimento. Essa abordagem permite uma análise mais adequada das alterações das variáveis, considerando a complexidade das respostas metabólicas envolvidas.

Tabela 1. Resumo com os coeficientes da regressão linear múltipla para variáveis de qualidade pós-colheita de mamão armazenado sob AC e ACF em função do tempo de armazenamento.

Variável	β_1 Tempo	β_2 Tratamento	β_3 Interação	R ²	Significância
PMF	0,45 (**)	ns	--	0,77	**
FF	-0,287 (.)	ns	ns	0,13	*
SS	-0,116 (*)	-1,27 (*)	ns	0,13	*
Hue	-1,35 (***)	ns	ns	0,30	***
L*	0,45 (*)	-4,17 (*)	ns	0,22	***
C*	1,30 (*)	ns	(.)	0,07	ns
ΔE	1,91 (***)	(.)	-0,82 (**)	0,63	***
AT	-0,0026 (*)	ns	ns	0,14	*
Ratio	ns	ns	ns	0,06	ns

Estimativas dos coeficientes da regressão linear ajustada para perda de massa fresca (PMF), firmeza (FF), sólidos solúveis (SS), ângulo hue (*Hue*), luminosidade (L*), croma (C*), diferença total de cor (ΔE), acidez titulável (AT) e ratio de frutos de mamão armazenados sob AC e ACF, em função do tempo de armazenamento. β_0 representa o intercepto, β_1 o efeito do tempo, β_2 o efeito do tratamento e β_3 a interação tempo \times tratamento. R² corresponde ao coeficiente de determinação do modelo. ns: não significativo; p<0,10; * p<0,05; ** p<0,01; *** p<0,001; (.) Tendência 0,05<p<0,10.

A análise de regressão indicou efeito significativo do tempo sobre a PMF (p<0,01), com coeficiente de determinação relativamente elevado (R² = 0,77), evidenciando tendência de aumento ao longo do armazenamento. Todavia, deve-se considerar que a dinâmica da perda de massa em frutos não apresenta, necessariamente, comportamento linear ao longo do tempo, sendo frequentemente associada a respostas fisiológicas mais complexas, que podem assumir padrão não linear.

Nesse contexto, embora o modelo ajustado indique uma tendência geral de aumento da PMF, a interpretação dos resultados foi fundamentada principalmente na análise das médias ao longo dos tempos de armazenamento, que representam de forma mais adequada a evolução do processo. Observou-se que a perda de massa ocorreu de forma progressiva durante o armazenamento, independente das condições avaliadas.

Para a FF, observou-se coeficiente angular negativo ($\beta_1 = -0,287$; p<0,10), indicando tendência de redução ao longo do armazenamento. Entretanto, o baixo

coeficiente de determinação do modelo ($R^2 = 0,13$) evidencia que a regressão apresentou limitada capacidade de descrever a variação dessa variável, refletindo a elevada variabilidade biológica entre os frutos.

Esse resultado reforça que o processo de amolecimento não ocorre de forma linear, mas sim de maneira dinâmica ao longo do amadurecimento, com intensificação após o início do climatério. Dessa forma, embora o modelo indique uma tendência geral de redução da firmeza, a interpretação mais adequada deve considerar a análise das médias ao longo do tempo de armazenamento.

Do ponto de vista fisiológico, a redução da firmeza está associada à degradação da parede celular, envolvendo a solubilização de pectinas e a atuação de enzimas como poligalacturonase e pectinametilesterase, processos regulados pelo etileno e característicos do amadurecimento de frutos climatéricos (Yao et al., 2014).

Para o SS, foram observados efeitos significativos do tempo ($\beta_1 = -0,116$; $p < 0,05$) e do tratamento ($\beta_2 = -1,27$; $p < 0,05$), indicando tendência de redução ao longo do armazenamento e valores inferiores no tratamento com fotocatalise. No entanto, o baixo coeficiente de determinação do modelo ($R^2 = 0,13$) evidencia que a regressão apresentou limitada capacidade explicativa, sugerindo que a variação dessa variável não foi adequadamente descrita por um modelo linear.

Nesse contexto, a interpretação dos resultados deve considerar principalmente a análise das médias ao longo dos tempos de armazenamento, as quais refletem de forma mais representativa a dinâmica do amadurecimento. A variação no teor de SS está associada ao balanço entre a formação e o consumo de açúcares, sendo comum observar aumento inicial seguido de redução, em função da utilização desses compostos como substrato respiratório em estágios mais avançados do amadurecimento. Esse comportamento é característico de frutos climatéricos, nos quais os açúcares solúveis participam ativamente do metabolismo energético, contribuindo para a manutenção dos processos fisiológicos durante o amadurecimento (Yao et al., 2014; Resende et al., 2012).

O ângulo *hue* apresentou efeito significativo do tempo ($\beta_1 = -1,35$; $p < 0,001$), indicando redução progressiva dos valores ao longo do armazenamento. Esse resultado evidencia que a mudança de coloração da casca está fortemente associada ao avanço do amadurecimento. A análise das médias ao longo dos tempos de armazenamento, reflete a evolução da coloração do fruto. A diminuição

do ângulo *hue* está diretamente relacionada à degradação da clorofila e à síntese de carotenoides, processos regulados pelo etileno e característicos do amadurecimento de frutos climatéricos, sendo esse parâmetro considerado um dos mais sensíveis para descrever essas mudanças (Bron et al., 2004).

A ausência de efeito significativo do tratamento indica que, apesar de a fotocatalise contribuir para o retardamento visual do amadurecimento, o tempo de armazenamento permanece como o principal fator determinante na evolução da coloração dos frutos.

Para o L^* , foram observados efeitos significativos do tempo ($\beta_1 = 0,45$; $p < 0,05$) e do tratamento ($\beta_2 = -4,17$; $p < 0,05$), com coeficiente de determinação intermediário ($R^2 = 0,22$). Esses resultados indicam tendência de aumento da luminosidade da casca ao longo do armazenamento, associada ao avanço do amadurecimento. No entanto, o valor moderado de R^2 sugere que o modelo linear descreve apenas parcialmente a variação dessa variável, sendo necessária cautela na interpretação dos coeficientes.

Dessa forma, a análise das médias ao longo dos tempos de armazenamento permite compreender de maneira mais adequada a evolução da luminosidade, evidenciando aumento do brilho da casca, relacionado à degradação da clorofila e a alterações na estrutura superficial do fruto, que aumentam a reflectância.

O efeito negativo do tratamento indica que os frutos submetidos à fotocatalise apresentaram menor intensidade dessas alterações, sugerindo que a redução do etileno no ambiente pode ter contribuído para retardar mudanças estruturais e visuais da casca durante o amadurecimento (Supapvanich e Promyou, 2017).

O parâmetro C^* apresentou efeito significativo do tempo ($\beta_1 = 1,30$; $p < 0,05$), indicando tendência de aumento ao longo do armazenamento. Porém, o baixo coeficiente de determinação do modelo ($R^2 = 0,07$) evidencia que a regressão apresentou reduzida capacidade explicativa. Nesse contexto, a interpretação deve considerar principalmente a análise das médias ao longo dos tempos de armazenamento, as quais indicam aumento da intensidade da coloração da casca durante o amadurecimento. Esse comportamento está associado à substituição gradual da clorofila por pigmentos carotenoides, resultando em cores mais saturadas.

A ausência de efeito significativo do tratamento indica que a fotocatalise não promoveu alterações consistentes nesse parâmetro. A interação com tendência à significância ($p < 0,10$) sugere possível variação na resposta entre os tratamentos ao longo do tempo, porém de forma pouco definida. Essa variabilidade reforça que o C^* é um parâmetro sensível a diferenças fisiológicas entre frutos, sendo frequentemente descrito como de maior dispersão em estudos com frutos tropicais (Brishti et al., 2013).

O parâmetro ΔE apresentou o maior coeficiente de determinação entre as variáveis avaliadas ($R^2 = 0,63$), com efeito significativo do tempo ($\beta_2 = 1,91$; $p < 0,001$) e interação significativa entre tempo e tratamento ($\beta_3 = -0,82$; $p < 0,01$). Esses resultados indicam que a variação global de cor foi fortemente influenciada pelo avanço do armazenamento e também pela condição de armazenamento ao longo do tempo.

Embora o modelo apresente melhor ajuste em relação às demais variáveis, é importante considerar que as alterações de cor em frutos climatéricos resultam de processos fisiológicos complexos e não necessariamente lineares. Ainda assim, a análise das médias ao longo do tempo confirma aumento progressivo do ΔE , evidenciando a intensificação das mudanças visuais durante o amadurecimento.

A interação negativa observada indica que o tratamento com fotocatalise reduziu a taxa de variação da cor ao longo do tempo, sugerindo efeito no retardamento do amadurecimento visual dos frutos. Esse comportamento está diretamente relacionado à menor disponibilidade de etileno no ambiente, o que pode retardar a degradação da clorofila e a síntese de carotenoides.

O ΔE é reconhecido como um dos parâmetros mais sensíveis para descrever mudanças cromáticas em frutos durante o armazenamento, por integrar diferentes atributos de cor em uma única variável, permitindo uma avaliação mais abrangente do processo de amadurecimento (McGuire, 1992; Zhang et al., 2021).

Para a AT, observou-se efeito significativo do tempo ($\beta_1 = -0,0026$; $p < 0,05$), indicando tendência de leve redução ao longo do armazenamento. No entanto, o baixo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,14$) evidencia que o modelo apresentou limitada capacidade de descrever a variação dessa variável. Dessa forma, a interpretação deve ser baseada principalmente na análise das médias ao longo dos tempos de armazenamento, as quais indicam relativa estabilidade da acidez durante o amadurecimento. Esse comportamento é frequentemente descrito para

o mamão, no qual a AT apresenta pequenas variações, sendo pouco sensível às condições de armazenamento (Galon et al., 2022).

Para a razão SS/AT, não foram observados efeitos significativos de nenhum dos fatores avaliados, associados a baixo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,06$). Esses resultados indicam que a variação dessa variável não foi adequadamente explicada pelo modelo, reforçando a limitação da abordagem linear para descrever esse parâmetro.

A relação SS/AT resulta do balanço entre açúcares e ácidos orgânicos, sendo influenciada por múltiplos processos metabólicos que ocorrem simultaneamente durante o amadurecimento. Por esse motivo, essa variável tende a apresentar comportamento mais complexo e não linear ao longo do tempo, sendo melhor interpretada a partir da análise conjunta das variáveis que a compõem.

A TR dos frutos, quantificada pela produção de CO_2 , apresentou padrão diferente entre os tratamentos ao longo do armazenamento (Figura 22). Os frutos armazenados em AC exibiram valores elevados de TR nos primeiros dias, seguidos por redução acentuada entre o nono e 12º dia de armazenamento.

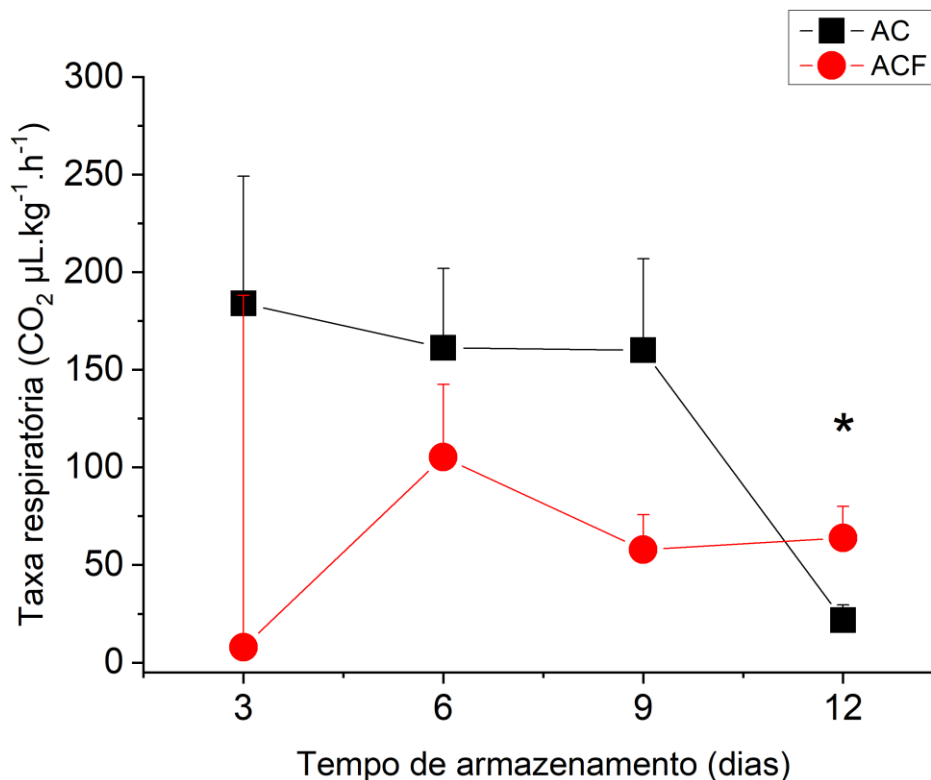


Figura 22: Taxa respiratória (produção de CO₂, µL.kg⁻¹.h⁻¹) de mamão 'Aliança' armazenado por 0, 3, 6, 9 e 12 dias sob AC e ACF a 25 °C. Os valores representam a média de 3 repetições e a barra o erro padrão. * Médias diferem estatisticamente entre si pelo teste *t* de Student, em nível de 5% de probabilidade.

A respiração é um dos principais processos fisiológicos associados ao amadurecimento e à senescência de frutos climatéricos, estando diretamente relacionada ao consumo de açúcares e ácidos orgânicos para produção de energia metabólica. A tendência na redução da TR nos frutos sob ACF pode estar associada à menor disponibilidade de C₂H₄ no ambiente de armazenamento, promovida pela fotocatalise. Em frutos climatéricos, C₂H₄ e respiração apresentam comportamento acoplado durante o amadurecimento (Yang e Hoffman, 1984).

Estudos demonstram que estratégias de manejo do C₂H₄ e do ambiente gasoso são eficazes na redução da TR, contribuindo para a manutenção da qualidade pós-colheita e o prolongamento da vida útil dos frutos (Watkins, 2006; Reitz e Mitcham, 2023). No trabalho de Reitz e Mitcham (2023), sistemas capazes de modular a respiração mostraram-se eficientes na redução da perda de qualidade, corroborando os resultados observados neste estudo.

A emissão de CO₂ não apresentou ajuste significativo ao modelo de regressão, diferentemente das demais variáveis avaliadas. Dessa forma, optou-se

por apresentar os coeficientes do modelo com o objetivo de evidenciar a variabilidade dos dados e a ausência de efeito consistente dos fatores analisados.

A análise de regressão indicou baixo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,20$) e ausência de significância global do modelo ($p > 0,05$), evidenciando que a variação da taxa respiratória não foi adequadamente explicada pelos fatores tempo e tratamento quando considerados sob abordagem linear (Tabela 2). Esse resultado demonstra que a dinâmica da respiração dos frutos ao longo do armazenamento não segue um modelo linear simples.

Nesse contexto, embora a regressão tenha sido realizada, a ausência de significância para o ajuste linear indica que esse modelo não é o mais adequado para descrever a variação da variável. Assim, a interpretação dos resultados foi baseada principalmente na análise das médias ao longo dos tempos de armazenamento, que representam de forma mais fiel a evolução da taxa respiratória.

Tabela 2. Resumo com os coeficientes da regressão linear para emissão de CO₂ de frutos de mamão armazenados sob AC e ACF, em função do tempo de armazenamento

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	t	valor-p
Intercepto	96,73	59,53	1,62	0,165
Tratamento	6,75	30,74	0,22	0,835
Tempo	-4,99	4,58	-1,09	0,326

São apresentadas as estimativas dos coeficientes, erro padrão, estatística t e valor-p do modelo ajustado. R^2 corresponde ao coeficiente de determinação do modelo. O modelo não foi significativo ($p > 0,05$). $R^2 = 0,20$

O coeficiente associado ao tempo apresentou sinal negativo ($\beta = -4,99$), porém sem significância estatística ($p > 0,05$), indicando apenas uma tendência de redução da emissão de CO₂ ao longo do armazenamento, sem evidência de um padrão definido. Esse comportamento pode ser explicado pela natureza climática do mamão, cuja respiração apresenta padrão não linear, caracterizado por aumento inicial até um pico respiratório, seguido de declínio em estágios mais avançados do amadurecimento. Além disso, embora o controle do etileno e da atmosfera possa modular a intensidade da respiração, a variabilidade intrínseca desse processo

tende a ser mantida, resultando em respostas menos consistentes ao longo do tempo (Rocha et al., 2005; Silva et al., 2009).

A produção de C_2H_4 pelos frutos apresentou diferenças significativas entre os tratamentos no nono e no décimo segundo dia de armazenamento (Figura 23). Os frutos armazenados em AC exibiram aumento progressivo da EmEt, com pico pronunciado no nono dia de armazenamento, seguido de redução no 12º dia. Esse padrão é característico de frutos climatéricos, onde a maior produção de C_2H_4 estimula o processo de amadurecimento do fruto.

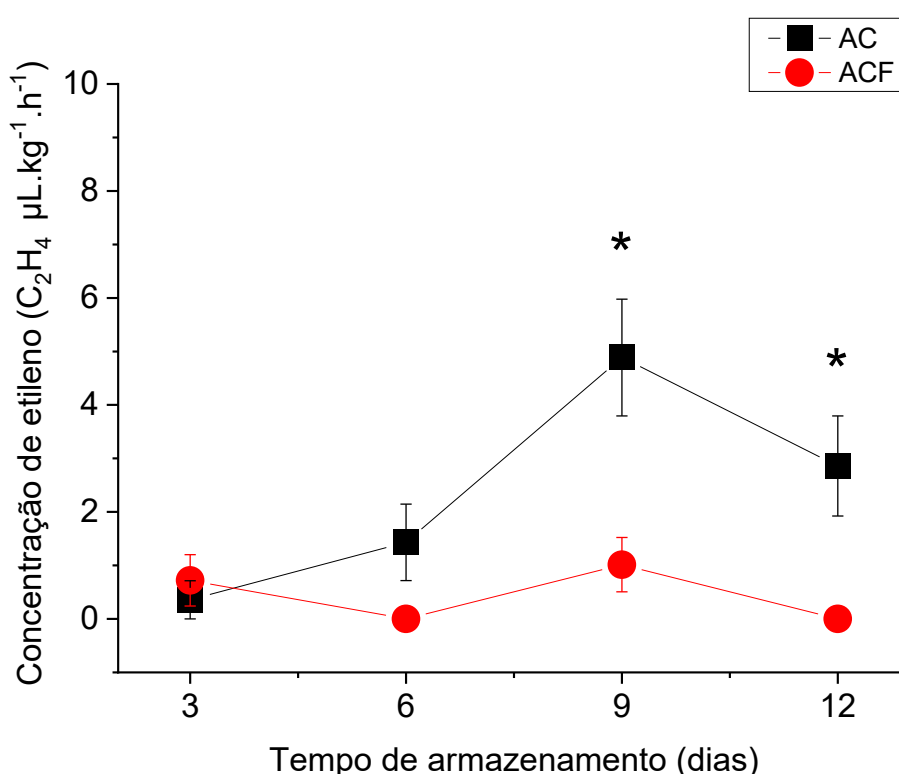


Figura 23: Concentração de EmEt (C_2H_4 , $\mu L.kg^{-1}.h^{-1}$) de mamão 'Aliança' armazenado por 0, 3, 6, 9 e 12 dias sob AC e ACF a 25 °C. Os valores representam a média de 3 repetições e a barra o erro padrão. * Médias diferem estatisticamente entre si pelo teste *t* de Student, em nível de 5% de probabilidade.

A redução da concentração de C_2H_4 no sistema de ACF impediu o estímulo autocatalítico na biossíntese do C_2H_4 , como pode ter acontecido com os frutos armazenados sob AC, uma vez que o C_2H_4 regula positivamente as enzimas ACC sintase e ACC oxidase envolvidas em sua própria produção (Yang e Hoffman, 1984). Dessa forma, a fotocatalise atuou não apenas na remoção física do C_2H_4 , mas também na modulação do metabolismo do fruto, retardando o amadurecimento e reduzindo processos associados à senescência.

Resultados semelhantes foram reportados em estudos com mamão utilizando tecnologias de controle do C_2H_4 , nos quais a redução da EmEt esteve associada à manutenção da firmeza, da coloração e da qualidade geral dos frutos durante o armazenamento (Zhu et al., 2023; Vinod et al., 2024).

A análise de regressão para a concentração de etileno apresentou coeficiente de determinação relativamente elevado ($R^2 = 0,63$), indicando que uma parcela expressiva da variação observada foi explicada pelos fatores incluídos no modelo (Tabela 3). No entanto, o modelo apresentou apenas tendência à significância ($p < 0,10$). Dessa forma, optou-se por apresentar os coeficientes do modelo com o objetivo de evidenciar a variabilidade dos dados e a ausência de efeito consistente dos fatores analisados.

Tabela 3. Coeficientes da regressão linear para concentração de etileno (C_2H_4) de frutos de mamão armazenados sob AC e ACF, em função do tempo de armazenamento

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	t	valor-p
Intercepto	1,49	1,14	1,31	0,246
Tratamento	-1,28	0,59	-2,18	0,081
Tempo	0,17	0,09	1,91	0,114

São apresentadas as estimativas dos coeficientes, erro padrão, estatística t e valor-p do modelo ajustado. R^2 corresponde ao coeficiente de determinação do modelo. O modelo apresentou tendência à significância ($p < 0,10$). $R^2 = 0,63$

O efeito do tratamento apresentou tendência à significância ($\beta = -1,28$; $p < 0,10$), indicando redução na concentração de etileno nos frutos armazenados sob atmosfera controlada com fotocatalise. Esse resultado sugere que a fotocatalise pode ter contribuído para a diminuição do etileno no ambiente de armazenamento (Shu et al., 2023).

Em relação ao tempo, observou-se coeficiente positivo ($\beta = 0,17$), também com tendência à significância ($p < 0,10$), indicando aumento gradual da concentração de etileno ao longo do armazenamento. Esse comportamento está de acordo com a fisiologia de frutos climatéricos, nos quais ocorre intensificação da produção de etileno durante o amadurecimento, mesmo sob condições de atmosfera controlada (Liu et al., 2022; Ohashi et al., 2016).

A partir dos coeficientes estimados pelo modelo, observa-se uma tendência de aumento da concentração de etileno ao longo do tempo de armazenamento, conforme indicado pelo coeficiente positivo associado ao tempo. Além disso, o coeficiente negativo do tratamento sugere que, em média, os frutos submetidos à atmosfera controlada associada à fotocatalise apresentaram menores concentrações de etileno em comparação ao tratamento sem fotocatalise.

Apesar dessas limitações, o valor relativamente elevado de R^2 indica que o modelo capturou uma tendência relevante, especialmente no que se refere ao efeito do tratamento, reforçando a evidência de que tecnologias de controle de etileno, como a fotocatalise, podem atuar na modulação da concentração desse gás no ambiente de armazenamento (Silva et al., 2009).

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que a integração da fotocatalise ao sistema de AC constitui uma estratégia promissora para o manejo fisiológico do mamão durante o período de pós-colheita.

De modo geral, a utilização da fotocatalise promoveu uma redução significativa na produção de C_2H_4 dos frutos em comparação ao armazenamento em AC. Essa modulação metabólica refletiu-se principalmente na manutenção da FF e no atraso na mudança de cor da casca dos frutos. Esses resultados indicam atraso no processo de amadurecimento dos frutos submetidos ao armazenamento sob AC com fotocatalise.

Em relação a PMF, teor de SS e AT não foram verificados efeitos significativos devido à remoção do C_2H_4 de dentro das câmaras de armazenamento pela fotocatalise.

A eficiência do sistema fotocatalítico desenvolvido foi confirmada por meio da análise da concentração de C_2H_4 ambiente pela técnica da fotoacústica, a qual evidenciou a redução da concentração de C_2H_4 durante o período de operação do sistema. Esse resultado confirma a ativação do catalisador à base de TiO_2 ativado por radiação UV e demonstra sua capacidade de promover a remoção do C_2H_4 do ambiente de armazenamento, contribuindo para o controle fisiológico do amadurecimento dos frutos.

A associação entre AC e fotocatalise representa uma alternativa viável para o controle do amadurecimento do mamão, contribuindo para a manutenção da qualidade pós-colheita, especialmente no que se refere a FF e à coloração da casca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ali, Z.M.; Chin, L.-H.; Lazan, H. (2004) A comparative study on wall degrading enzymes, pectin modifications and softening during ripening of selected tropical fruits. *Plant Science*, 167(2): 317–327. DOI: 10.1016/j.plantsci.2004.03.030.

Anese, R.O.; Brackmann, A.; Thewes, F.R.; Schultz, E.E.; Ludwig, V.; Wendt, L.M.; Wagner, R.; Klein, B. (2020) Impact of dynamic controlled atmosphere storage and 1-methylcyclopropene treatment on quality and volatile organic compounds profile of 'Galaxy' apple. *Food Packaging and Shelf Life*, 23: 100443. DOI: 10.1016/j.fpsl.2019.100443.

Barros, D.M.; Silva, A.P.F.; Moura, D.F.; Medeiros, S.M.F.R.S.; Cavalcanti, I.D.L.; Silva, J.H.L.; França Leite, A.R.; Santos, J.M.S.; Melo, M.A.; Costa, J.O.; Silva, G.M.; Oliveira, G.B.; Rocha, T.A.; Costa, M.P.; Padilha, A.C.B.; Ferreira, S.A.O.; Fonte, R.A.B. (2020) Principais técnicas de conservação dos alimentos. *Brazilian Journal of Development*, 6(1): 330–343. DOI: 10.34117/bjd6n1-056.

Barry, C.S.; Giovannoni, J.J. (2007) Ethylene and fruit ripening. *Journal of Plant Growth Regulation*, 26: 143–159. DOI: 10.1007/s00344-007-9002-y.

Basso, A.; Moreira, R.F.P.M.; José, H.J. (2018) Effect of operational conditions on photocatalytic ethylene degradation applied to control tomato ripening. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 366: 130–137. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2018.08.027.

Batista, D.; Reis, R.; Almeida, J.; Rezende, B.; Bragança, C.; Silva, F. (2019) Edible coatings in post-harvest papaya: impact on physical–chemical and sensory characteristics. *Journal of Food Science and Technology*, 57: 274–281. DOI: 10.1007/s13197-019-04057-1.

Bessemans, N.; Verboven, P.; Verlinden, B.E.; Nicolaï, B.M. (2016) A novel type of dynamic controlled atmosphere storage based on the respiratory quotient (RQ-DCA). *Postharvest Biology and Technology*, 115: 91–102. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2015.12.019.

Bessemans, N.; Verboven, P.; Verlinden, B.E.; Nicolaï, B.M. (2018) Model-based leak correction of real-time RQ measurement for dynamic controlled atmosphere storage. *Postharvest Biology and Technology*, 135: 33–43. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2017.09.011.

Brishti, F. H.; Misir, J.; Sarker, A. (2013) Effect of biopreservatives on storage life of papaya (*Carica papaya* L.). *International Journal of Food Studies*, 2(1): 126–136. DOI: 10.7455/ijfs/2.1.2013.a10.

Brizzolara, S.; Manganaris, G.A.; Fotopoulos, V.; Watkins, C.B.; Tonutti, P. (2020) Primary Metabolism in Fresh Fruits During Storage. *Frontiers in Plant Science*, 11: 80. DOI: 10.3389/fpls.2020.00080.

Bron, I.U.; Jacomino, A.P. (2006). Ripening and quality of 'Golden' papaya fruit harvested at different maturity stages. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18(3): 389–396. DOI: 10.1590/S1677-04202006000300005.

Carvalho, E.M.L.; Reis, R.C.; Borges, V.P.; Ledo, C.A.S.; Araújo, E.S.; Dantas, J.L.L. (2020) Physicochemical and sensory properties of papaya fruits of elite lines and hybrids. *Semina: Ciências Agrárias*, 41(1): 121–130. DOI: 10.5433/1679-0359.2020v41n1p121.

Delele, M. A.; Bessemans, N.; Gruyters, W.; Rogge, S.; Janssen, S.; Verlinden, B. E.; Smeets, B.; Ramon, H.; Verboven, P.; Nicolai, B. M. (2019) Spatial distribution of gas concentrations and RQ in a controlled atmosphere storage container with pear fruit in very low oxygen conditions. *Postharvest Biology and Technology*, 156: 110903. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2019.05.004.

Escobedo-Avellaneda, Z.; Welte-Chanes, J. (2016) Controlled atmosphere storage: applications for bulk storage of foodstuffs. *In: Encyclopedia of Food and Health*. Academic Press, Oxford, p. 195–200. DOI: 10.1016/B978-0-12-384947-2.00196-3.

Fabi, J.P.; Prado, S.B.R. (2019) Fast and furious: ethylene-triggered changes in the metabolism of papaya fruit during ripening. *Frontiers in Plant Science*, 10: 535. DOI: 10.3389/fpls.2019.00535.

Fahmy, K.; Violalita, F.; Chatib, O.C.; Andasuryani; Yulia, R.; Nakano, K. (2019) The individual influences of high CO₂ on chilling injury suppression of 'Merah Delima' papaya fruit. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 230(1): 012016. DOI: 10.1088/1755-1315/230/1/012016.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations (2024). FAOSTAT. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/>>. Acesso em: 12 abril 2024.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations (2023). Responsible consumption and production: Ensure sustainable consumption and production patterns. Disponível em: <<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/3a8baf8c-960d-4105-9538-e4bd9b1d4503/content/cc7088en.html#/12>>. Acesso em: 03 fevereiro 2025.

Fonseca, M.J.O.; Cenci, S.A.; Leal, N.R.; Botrel, N. (2003) Uso de atmosfera controlada para conservação pós-colheita do mamão 'Golden'. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 25(3): 537–539.

Fujishima, A.; Honda, K. (1972) Electrochemical photolysis of water at a semiconductor electrode. *Nature*, 238: 37–38. DOI: 10.1038/238037a0.

Gallon, Z.C.; Shiga, T.; Purgatto, E.; Jacomino, A.P. (2022) Occurrence of early softening in papaya due to specific cell wall-related changes. *Scientia Horticulturae*, 297: 110915. DOI: 10.1016/j.scienta.2022.110915.

Goulart, C.; Cantillano, R.F.F.; Aguiar, G.A.; Kirinus, M.B.M.; Mello-Farias, P.C.; Malgarim, M.B. (2022) Preservation of cv. Jubileu peaches in a conventional cold storage system under a dynamic controlled atmosphere. *Semina: Ciências Agrárias*, 43(4): 1737–1750. DOI: 10.5433/1679-0359.2022v43n4p1737.

Ibhadon, A.; Fitzpatrick, P. (2013) Heterogeneous photocatalysis: Recent advances and applications. *Catalysts*, 3(1): 189–218. DOI: 10.3390/catal3010189.

Imahori, Y.; Suzuki, Y.; Uemura, K.; Kishioka, I.; Fujiwara, H.; Ueda, Y.; Chachin, K. (2004) Physiological and quality responses of Chinese chive leaves to low oxygen atmosphere. *Postharvest Biology and Technology*, 31(3): 295–303. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2003.09.004.

Jiang, B.; Ou, S.; Xu, L.; Mai, W.; Ye, M.; Gu, H.; Zhang, T.; Yuan, C.; Shen, C.; Wang, J.; Liu, K. (2019) Comparative proteomic analysis provides novel insights into the regulation mechanism underlying papaya (*Carica papaya* L.) exocarp during fruit ripening process. *BMC Plant Biology*, 19: 267. DOI: 10.1186/s12870-019-1845-4.

John, A.; Yang, J.; Liu, J.; Jiang, Y.; Yang, B. (2018) The structure changes of water-soluble polysaccharides in papaya during ripening. *International Journal of Biological Macromolecules*, 115: 152–156. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.04.059.

Kandasamy, P.; Mukherjee, S. (2019) Enhancing shelf life of tomato under controlled atmosphere condition using diffusion channel system. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12(1): 15–22. DOI: 10.1016/j.eaef.2018.07.001.

Kang, X.; Liu, S.; Dai, Z.; He, Y.; Song, X.; Tan, Z. (2019) Titanium dioxide: from engineering to applications. *Catalysts*, 9(2): 191. DOI: 10.3390/catal9020191.

Keller, N.; Ducamp, M.N.; Robert, D.; Keller, V. (2013) Ethylene removal and fresh product storage: a challenge at the frontiers of chemistry. Toward an approach by

photocatalytic oxidation. *Chemical Reviews*, 113(7): 5029–5070. DOI: 10.1021/cr900398v.

Koul, B.; Pudhuvai, B.; Sharma, C.; Kumar, A.; Sharma, V.; Yadav, D.; Jin, J. O. (2022) *Carica papaya* L.: A tropical fruit with benefits beyond the tropics. *Diversity*, 14: 683. DOI: 10.3390/d14080683.

Lane, C.; Al Shoffe, Y.; Kao-Kniffin, J.; Watkins, C.B. (2023) Aminoethoxyvinylglycine and low oxygen controlled atmosphere storage shift functional microbiomes of 'Gala' apples. *Postharvest Biology and Technology*, 206: 112546. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2023.112546.

Li, F.; Cheng, L.; Fan, J.; Xiang, Q. (2021) Steering the behavior of photogenerated carriers in semiconductor photocatalysts: a new insight and perspective. *Journal of Materials Chemistry A*, 9: 23765–23782. DOI: 10.1039/D1TA06899G.

Li, R.; Wang, Y.; Li, W.; Shao, Y. (2023) Comparative analyses of ripening, texture properties and cell wall composition in three tropical fruits treated with 1-methylcyclopropene during cold storage. *Horticulturae*, 9(2): 126. DOI: 10.3390/horticulturae9020126.

Li, X.; Chen, Y.; Tao, Y.; Shen, L.; Xu, Z.; Bian, Z.; Li, H. (2022) Challenges of photocatalysis and their coping strategies. *Chem Catalysis*, 2(6): 1315–1345. DOI: 10.1016/j.checat.2022.04.007.

Liu, J.; Islam, M.T.; Sherif, S.M. (2022) Effects of aminoethoxyvinylglycine (AVG) and 1-methylcyclopropene (1-MCP) on the pre-harvest drop rate, fruit quality, and stem-end splitting in 'Gala' apples. *Horticulturae*, 8(12): 1100. DOI: 10.3390/horticulturae8121100.

Liu, Y.; Tang, M.; Liu, M.; Su, D.; Chen, J.; Gao, Y.; Bouzayen, M.; Li, Z. (2020) The molecular regulation of ethylene in fruit ripening. *Small Methods*, 4(3): 1900485. DOI: 10.1002/smtd.201900485.

Liu, Y.; Wu, J.; Li, Y.; Deng, W.; Cao, K.; Li, Z.; Wang, L. (2024) Metabolism and transcriptional regulation in chilling injury development of nectarine fruit during postharvest cold storage. *Postharvest Biology and Technology*, 210: 112748. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2023.112748.

Liu, Z.; Jiang, F.; Mo, Y.; Liao, H.; Chen, P.; Zhang, H. (2022) Effects of ethanol treatment on storage quality and antioxidant system of postharvest papaya. *Frontiers in Plant Science*, 13: 856499. DOI: 10.3389/fpls.2022.856499.

Lourenço, R.E.R.S.; Linhares, A.A.N.; Oliveira, A.V.; Silva, M.G.; Oliveira, J.G.; Canela, M.C. (2017) Photodegradation of ethylene by use of TiO₂ sol-gel on polypropylene and on glass for application in the postharvest of papaya fruit. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(14): 12805–12814. DOI: 10.1007/s11356-016-8197-5.

Mahajan, P.; Lee, D. (2023) Modified atmosphere and moisture condensation in packaged fresh produce: Scientific efforts and commercial success. *Postharvest Biology and Technology*, 198: 112235. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2022.112235.

Maldonado, A.; Aguilar, T.; Hauser, C.; Wehnert, G.; Söthje, D.; Schlachter, H.; Torres, A.; Bruna, J.; Valenzuela, X.; Rodríguez-Mercado, F. (2024) Ethylene scavenging films based on ecofriendly plastic materials and nano-TiO₂: preparation, characterization, and in vivo evaluation. *Polymers*, 16(6): 853. DOI: 10.3390/polym16060853.

Mamaghani, A.H.; Haghghat, F.; Lee, C.S. (2017) Photocatalytic oxidation technology for indoor environment air purification: The state-of-the-art. *Applied Catalysis B: Environmental*, 203: 247–269. DOI: 10.1016/j.apcatb.2016.10.037.

Mangolin, G.S.; Konda, E.T.; Baptista, R.Z.; Nascimento, R.S.; Terao, D. (2018) Tratamento hidrotérmico no controle de podridão peduncular em mamão papaya. In: 12º Congresso Interinstitucional de Iniciação Científica (CIIC), 01–03 de agosto de 2018, Campinas, São Paulo. ISBN: 978-85-7029-145-5. Trabalho nº 18411.

Marques, F.C.; Stumbob, A.M.; Canela, M.C. (2017) Estratégias e materiais utilizados em fotocatalise heterogênea para geração de hidrogênio através da fotólise da água. *Química Nova*, 40(7): 813–824. DOI: 10.21577/0100-4042.20170015.

Martins, D.S.; Ventura, J.A.; Ferregueti, G.A.; Marin, S.L.D. (2024) Recomendações técnicas para o cultivo do mamoeiro. Incaper – Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. DOI: 10.54682/livro.9788589274487.

Martins, D.R.; Resende, E.D. (2013) Quality of 'Golden' papaya stored under controlled atmosphere conditions. *Food Science and Technology International*, 19(4): 307–316. DOI: 10.1177/1082013212462228.

Martins, D.R.; Barbosa, N.C.; Resende, E.D. (2014) Respiration rate of 'Golden' papaya stored under refrigeration and with different controlled atmospheres. *Scientia Agricola*, 71(5): 369–373. DOI: 10.1590/0103-9016-2013-0334.

Martins, D.R.; Resende, E.D. (2015) External quality and sensory attributes of papaya cv. Golden stored under different controlled atmospheres. *Postharvest Biology and Technology*, 110: 1–8. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2015.06.018.

McGuire, R.G. (1992) Reporting of objective color measurements. *HortScience*, 27: 1254-1255. DOI: 10.21273/HORTSCI.27.12.1254.

Meng, X.; Fang, J.; Fu, M.; Jiao, W.; Ren, P.; Yang, X. (2023) The role of 1-methylcyclopropylene (1-MCP) and salicylic acid (SA) in induced resistance of postharvest fruits. *Horticulturae*, 9(1): 108. DOI: 10.3390/horticulturae9010108.

Mohamadpour, F.; Amani, A. M. (2024) Photocatalytic systems: reactions, mechanism, and applications. *RSC Advances*, 14: 20609-20645. DOI: 10.1039/D4RA03259D.

Nunes, J.B. (2025) Espectroscopia fotoacústica na avaliação da bucha vegetal *Luffa cylindrica* como suporte de TiO₂ na degradação fotocatalítica do etileno. Dissertação (Mestrado em Ciências Naturais) – Campos dos Goytacazes – RJ, RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 46p.

Ohashi, T. L.; Foukaraki, S.; Corrêa, D. S.; Ferreira, M. D.; Terry, L. (2016) Influence of 1-methylcyclopropene on the biochemical response and ripening of ‘Solo’ papayas. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 38(2): e-791. DOI: 10.1590/0100-29452016791.

Oliveira V.C.; Mendes F.Q. (2021). Técnicas de preservação pós-colheita de frutas e hortaliças: uma revisão narrativa. *In: Ciência e Tecnologia de Alimentos: Pesquisa e Práticas Contemporâneas - Volume 2*, p. 718–733. Editora Científica Digital. DOI:<https://doi.org/10.37885/210805750>

Pathak, N.; Caleb, O.J.; Geyer, M.; Herppich, W.B.; Rauh, C.; Mahajan, P.V. (2017) Photocatalytic and photochemical oxidation of ethylene: potential for storage of fresh produce - a review. *Food and Bioprocess Technology*, 10(6): 982–1001. DOI: 10.1007/s11947-017-1889-0.

Pathak, N.; Caleb, O.J.; Rauh, C.; Mahajan, P.V. (2019) Efficacy of photocatalysis and photolysis systems for the removal of ethylene under different storage conditions. *Postharvest Biology and Technology*, 147: 68–77. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2018.09.006.

Paull, R.E.; Oliveira, J.G. (2020). Tropical fruits: Papayas. *Controlled and Modified Atmospheres for Fresh and Fresh-Cut Produce*, p. 373–379. Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-804599-2.00024-7

Pegoraro, C.; Tadiello, A.; Girardi, C.L.; Chaves, F.C.; Quecini, V.; Oliveira, A.C.; Trainotti, L.; Rombaldi, C.V. (2015) Transcriptional regulatory networks controlling woolliness in peach in response to preharvest gibberellin application and cold storage. *BMC Plant Biology*, 15: 279. DOI: 10.1186/s12870-015-0659-2.

Pereira, T.; Almeida, P.S.G.; Azevedo, I.G.; Cunha, M.; Oliveira, J.G.; Silva, M.G.; Vargas, H. (2009) Gas diffusion in 'Golden' papaya fruit at different maturity stages. *Postharvest Biology and Technology*, 54(2): 80–86. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2009.07.010.

Poel, B. V.; Smet, D.; Van Der Straeten, D. (2015) Ethylene and hormonal cross talk in vegetative growth and development. *Plant Physiology*, 169(1): 61–72. DOI: 10.1104/pp.15.00724.

Poonsri, W. (2021) Effects of high CO₂ and low O₂ on biochemical changes in cut *Dendrobium* orchids. *Heliyon*, 7(3): e06126. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06126.

Popa, C. (2019) Ethylene measurements from sweet fruits flowers using photoacoustic spectroscopy. *Molecules*, 24(6): 1144. DOI: 10.3390/molecules24061144.

Qu, Y.; Duan, X. (2013) Progress, challenge and perspective of heterogeneous photocatalysts. *Chemical Society Reviews*, 42: 2568–2580. DOI: 10.1039/C2CS35355E.

Raghavan, G.S.V.; Garipey, Y. (1985) Structure and instrumentation aspects of storage systems. *Acta Horticulturae*, 157: 1–12. DOI: 10.17660/ActaHortic.1985.157.1.

Reitz, N.F.; Mitcham, E.J. (2023) A novel system for rapidly predicting produce water loss and measuring respiration rate. *Computers and Electronics in Agriculture*, 210: 107873. DOI: 10.1016/j.compag.2023.107873.

Riaño, C.; Ribba, T.; Marchant, J.I.; O'Brien, J.A.; Contreras, C.; Zoffoli, J.P. (2022) Ultra-low oxygen and preconditioning storage regulate ethylene synthesis to prevent corky disorders in 'Fuji' apple. *Frontiers in Plant Science*, 13: 910139. DOI: 10.3389/fpls.2022.910139.

Rocha, R.H.C.; Nascimento, S.R.C.; Menezes, J.B.; Nunes, G.H.S.; Silva, E.O. (2005) Qualidade pós-colheita do mamão Formosa armazenado sob refrigeração. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 27(3): 386–389. DOI: 10.1590/S0100-29452005000300012.

Rodríguez, M.; Malato, S.; Pulgarin, C.; Contreras, S.; Curc6, D.; Giménez, J. (2005) Optimizing the solar photo-Fenton process in the treatment of contaminated water: Determination of intrinsic kinetic constants for scale-up. *Solar Energy*, 79(4): 360–368. DOI: 10.1016/j.solener.2005.02.024.

Romani, R.J. (1984) Respiration, ethylene, senescence, and homeostasis in an integrated view of postharvest life. *Canadian Journal of Botany*, 62: 2950–2955. DOI: 10.1139/b84-394.

Saltveit, M.E. (1999) Effect of ethylene on quality of fresh fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 15(3): 279–292. DOI: 10.1016/S0925-5214(98)00091-X.

Satekge, T.K.; Magwaza, L.S. (2022) Postharvest application of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on climacteric fruits: factors affecting efficacy. *International Journal of Fruit Science*, 22(1): 595–607. DOI: 10.1080/15538362.2022.2085231.

Schudel, S.; Shoji, K.; Shrivastava, C.; Onwude, D.; Defraeye, T. (2023) Solution roadmap to reduce food loss along your postharvest supply chain from farm to retail. *Food Packaging and Shelf Life*, 36: 101057. DOI: 10.1016/j.fpsl.2023.101057.

Shen, Y.H.; Yang, F.Y.; Lu, B.G.; Zhao W.W.; Jiang T.; Feng L.; Chen X.J.; Ming R. (2019) Exploring the differential mechanisms of carotenoid biosynthesis in the yellow peel and red flesh of papaya. *BMC Genomics*, 20: 49. DOI: 10.1186/s12864-018-5388-0.

Shu, C.; Wall, M.M.; Follett, P.A.; Sugimoto, N.; Bai, J.; Sun, X. (2023) Effect of humidity-triggered controlled-release 1-methylcyclopropene (1-MCP) on postharvest quality of papaya fruit. *Horticulturae*, 9(10): 1062. DOI: 10.3390/horticulturae9101062.

Silva, L. R. A.; Silva, G. M. C.; Silva, W. B.; Souza, C. L. M.; Oliveira, J. G. (2015) Respiratory activity in isolated mitochondria from the pulp of UENF/Caliman01 and Tainung01 papaya in postharvest fruit conservation. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 37(2): 296–307. DOI: 10.1590/0100-2945-079/14.

Silva, M.M.; Cardoso, F.F.; Osório, J.C.S. (2009) Potassium permanganate effects in postharvest conservation of the papaya cultivar Sunrise Golden. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44(7): 777–783. DOI: 10.1590/S0100-204X2009000700003.

Soares, C.G.; Prado, S.B.R.; Andrade, S.C.S.; Fabi, J.P. (2021) Systems biology applied to the study of papaya fruit ripening: The influence of ethylene on pulp softening. *Cells*, 10(9): 2339. DOI: 10.3390/cells10092339.

Souza, A.F.; Silva, W.B.; Gonçalves, Y.S.; Silva, M.G.; Oliveira, J.G. (2014) Ripening physiology of varieties of papaya commercialized in Brazil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 36(2): 385–395. DOI: 10.1590/0100-2945-215/13.

Supapvanich, S.; Promyou, S. (2017) Hot water incorporated with salicylic acid dips maintaining physicochemical quality of ‘Holland’ papaya fruit stored at room temperature. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 29(1): 18–24. DOI: 10.9755/ejfa.2016-07-966.

Thewes, F.R.; Both, V.; Brackmann, A.; Weber, A.; Anese, R.O. (2015) Dynamic controlled atmosphere and ultralow oxygen storage on ‘Gala’ mutants quality maintenance. *Food Chemistry*, 188: 490–497. DOI: 10.1016/j.foodchem.2015.04.128.

Vinod, B.R.; Asrey, R.; Meena, N.K.; Sethi, S.; Prakash, J.; Chawla, G.; Menaka, M.; Ahamad, S. (2024) Ozonized water treatment enhances quality and storage life of 'Red Lady' papaya fruit during cold storage. *Scientia Horticulturae*, 328: 112859. DOI: 10.1016/j.scienta.2024.112859.

Wang, Z.; Li, Z.; Ren, W. (2016) Quartz-enhanced photoacoustic detection of ethylene using a 10.5 μm quantum cascade laser. *Optics Express*, 24(4): 4143–4154. DOI: 10.1364/OE.24.004143.

Watkins, C.B. (2006) The use of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on fruits and vegetables. *Biotechnology Advances*, 24(4): 389–409. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2006.01.005.

Wei, H.; Seidi, F.; Zhang, T.; Jin, Y.; Xiao, H. (2021) Ethylene scavengers for the preservation of fruits and vegetables: A review. *Food Chemistry*, 337: 127750. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.127750.

Wijesinghe, D.R.; Zobair, M.A.; Esmaeelpour, M. (2024) A review on photoacoustic spectroscopy techniques for gas sensing. *Sensors*, 24(20): 6577. DOI: 10.3390/s24206577.

Wills, R.B.H. (2021) Potential for more sustainable energy usage in the postharvest handling of horticultural produce through management of ethylene. *Climate*, 9(10): 147. DOI: 10.3390/cli9100147.

Wright, A.H.; DeLong, J.M.; Arul, J.; Prange, R.K. (2015) The trend toward lower oxygen levels during apple (*Malus x domestica* Borkh) storage. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 90(2): 135–142. DOI: 10.1080/14620316.2015.11513146.

Wu, W.; Jiang, B.; Liu, R.; Han, Y.; Fang, X.; Mu, H.; Farag, M.A.; Simal-Gandara, J.; Prieto, M.A.; Chen, H.; Xiao, J.; Gao, H. (2023) Structures and functions of

cuticular wax in postharvest fruit and its regulation: A comprehensive review with future perspectives. *Engineering*, 23: 118–129. DOI: 10.1016/j.eng.2022.12.006.

Xu, C.; Ravi Anusuyadevi, P.; Aymonier, C.; Luque, R.; Marre, S. (2019) Nanostructured materials for photocatalysis. *Chemical Society Reviews*, 48: 3868–3902. DOI: 10.1039/C9CS00102F

Yang, S.F.; Hoffman, N.E. (1984) Ethylene biosynthesis and its regulation in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 35: 155–189.

Yao, B. N.; Tano, K.; Konan, H. K.; Bédié, G. K.; Oulé, M. K.; Koffi-Nevry, R.; Arul, J. (2014) The role of hydrolases in the loss of firmness and of the changes in sugar content during the post-harvest maturation of *Carica papaya* L. var solo 8. *Journal of Food Science and Technology*, 51(11): 3309–3316. DOI: 10.1007/s13197-012-0858-x.

Zhang, J.; Ma, Y.; Dong, C.; Terry, L.A.; Watkins, C.B.; Yu, Z.; Cheng, Z.-M. (2020) Meta-analysis of the effects of 1-methylcyclopropene (1-MCP) treatment on climacteric fruit ripening. *Horticulture Research*, 7: 208. DOI: 10.1038/s41438-020-00405-x.

Zhang, C.; Qiao, S.; Ma, Y. (2023) Highly sensitive photoacoustic acetylene detection based on differential photoacoustic cell with retro-reflection-cavity. *Photoacoustics*, 31: 100467. DOI: 10.1016/j.pacs.2023.100467.

Zhou, Y.; Liu, X.; Liang, X.; Li, H.; Lai, J.; Liao, Y.; Liu, K. (2024) Biochemical and metabolomics analyses reveal the mechanisms underlying ascorbic acid and chitosan coating mediated energy homeostasis in postharvest papaya fruit. *Food Chemistry*, 428: 138168. DOI: 10.1016/j.foodchem.2023.138168.