

UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA (UNEB)
Pró-Reitoria de Pesquisa e Ensino de Pós-Graduação (PPG)
Departamento de Tecnologia e Ciências Sociais (DTCS)
Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Horticultura Irrigada (PPGHI)

TASSIANE ALVES DE SOUZA

**NÍVEIS MÍNIMOS DE OXIGÊNIO PARA A MÁXIMA INIBIÇÃO DO
METABOLISMO AERÓBICO DE MANGAS ‘TOMMY ATKINS’ E ‘PALMER’ EM
CONDIÇÕES DE ATMOSFERA CONTROLADA**

JUAZEIRO-BA

2024

UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA (UNEB)
Pró-Reitoria de Pesquisa e Ensino de Pós-Graduação (PPG)
Departamento de Tecnologia e Ciências Sociais (DTCS)
Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Horticultura Irrigada (PPGHI)

TASSIANE ALVES DE SOUZA

**NÍVEIS MÍNIMOS DE OXIGÊNIO PARA A MÁXIMA INIBIÇÃO DO
METABOLISMO AERÓBICO DE MANGAS ‘TOMMY ATKINS’ E ‘PALMER’ EM
CONDIÇÕES DE ATMOSFERA CONTROLADA**

Dissertação apresentada junto ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Horticultura Irrigada da Universidade do Estado da Bahia (PPGHI- UNEB/DTCS), como requisito para a obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração: Horticultura Irrigada.

Orientador: Sérgio Tonetto de Freitas
Coorientadora: Luana Ferreira dos Santos

JUAZEIRO-BA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
por Regivaldo José da Silva/CRB-5-1169

S729n

Souza, Tassiane Alves de

Níveis mínimos de oxigênio para a máxima inibição do metabolismo aeróbico de mangas 'Tommy Atkins' e 'Palmer' em condições de atmosfera controlada / Tassiane Alves de Souza. Juazeiro-BA, 2024.

93 fls.: il.

Orientador(a): Prof. Dr. Sérgio Tonetto de Freitas.

Co orientador(a): Prof.^a Dr^a Luana Ferreira dos Santos.

Inclui Referências

Dissertação (Mestrado Acadêmico) – Universidade do Estado da Bahia. Departamento de Tecnologia e Ciências Sociais – DTCS. Programa de Pós-Graduação em Horticultura Irrigada - PPGHI, Campus III. 2024.

1. Atmosfera controlada. 2. *Mangifera Indica* L. 3. Manga pós-colheita.
4. Armazenamento. I. Freitas, Sérgio Tonetto. II. Santos, Luana Ferreira dos.
III. Universidade do Estado da Bahia. Departamento de Tecnologia e Ciências Sociais – DTCS. IV. Título.

CDD: 634.772

UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA (UNEB)
Pró-Reitoria de Pesquisa e Ensino de Pós-Graduação (PPG)
Departamento de Tecnologia e Ciências Sociais (DTCS)
Programa de Pós-Graduação em Agronomia: Horticultura Irrigada (PPGHI)

TASSIANE ALVES DE SOUZA

**NÍVEIS MÍNIMOS DE OXIGÊNIO PARA A MÁXIMA INIBIÇÃO DO
METABOLISMO AERÓBICO DE MANGAS 'TOMMY ATKINS' E 'PALMER'
EM CONDIÇÕES DE ATMOSFERA CONTROLADA**

Aprovada em: 12/03/2024

Documento assinado digitalmente
gov.br **SERGIO TONETTO DE FREITAS**
Data: 08/04/2024 11:21:22 -0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

SÉRGIO TONETTO DE FREITAS
EMBRAPA SEMIÁRIDO/UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA- UNEB

Documento assinado digitalmente
gov.br **LUANA FERREIRA DOS SANTOS**
Data: 09/04/2024 13:21:11 -0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

LUANA FERREIRA DOS SANTOS
EMBRAPA SEMIÁRIDO


ALESSANDRO CARLOS MESQUITA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DA BAHIA- UNEB

Documento assinado digitalmente
gov.br **VESPASIANO BORGES DE PAIVA NETO**
Data: 09/04/2024 07:07:28 -0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

VESPASIANO BORGES DE PAIVA NETO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO- UNIVASF

DEDICATÓRIA

Dedico ao meu pai, José Alves de Souza Neto (in memoriam)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por mais essa conquista, por tudo que vivi nessa jornada.

A minha família que sempre me apoia e cuida de mim.

Ao meu orientador Prof. Sérgio Tonetto por todos os ensinamentos, paciência e inspiração, também agradeço a Luana Ferreira, por toda parceria, cuidado e atenção.

Agradeço a Universidade do Estado da Bahia- UNEB e ao Programa de Pós-Graduação de Agronomia e Horticultura Irrigada, por toda assistência prestada a mim ao longo desses anos. Ao CNPQ pela concessão da bolsa e incentivo a pesquisa.

Agradeço aos meus amigos que convivem comigo diariamente, em especial Glória Caroline e família. A toda equipe do laboratório de Fisiologia Pós-Colheita da Embrapa Semiárido, em especial meus queridos amigos, Débora, Nilo Ricardo, Bruna, Sandy, Jasciane, Ester, Caio e Wellerson, que tornaram essa jornada mais leve, me apoiaram e ensinaram tanto. A Prof. ^a Karla, que tão bem me orientou durante o estágio docência.

Enfim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para que eu chegasse até aqui, muito obrigada!

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	7
RESUMO.....	9
REVISÃO DE LITERATURA.....	12
ARMAZENAMENTO REFRIGERADO.....	14
ATMOSFERA CONTROLADA.....	14
ATMOSFERA CONTROLADA DINÂMICA.....	16
ACD monitorada pela produção de etanol pelas frutas (ACD-ET).....	17
ACD monitorada pela fluorescência de clorofilas (ACD-FC).....	18
ACD monitorada pelo quociente respiratório (ACD-QR).....	18
ETILENO.....	19
REFERÊNCIAS.....	21
CAPÍTULO I.....	30
NÍVEIS MÍNIMOS DE O ₂ DURANTE O ARMAZENAMENTO PARA INIBIR A RESPIRAÇÃO AERÓBICA E PROLONGAR A VIDA PÓS-COLHEITA DE MANGAS 'TOMMY ATKINS' PRODUZIDAS EM DIFERENTES ÉPOCAS NO VALE DO SÃO FRANCISCO.....	30
RESUMO.....	30
INTRODUÇÃO.....	32
MATERIAL E MÉTODOS.....	33
MATERIAL VEGETAL E CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS.....	33
DEFINIÇÃO DE NÍVEIS MÍNIMOS DE O ₂ PARA MANTER A RESPIRAÇÃO AERÓBICA.....	34
Determinação de níveis de O ₂ , CO ₂ , quociente respiratório e etanol.....	34
Atmosfera com absorção de CO ₂	35
VALIDAÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O ₂ SOB CONDIÇÕES DE ATMOSFERA CONTROLADA DINÂMICA (ACD).....	35
ANÁLISE DA QUALIDADE DAS FRUTAS.....	36
Taxa respiratória.....	36
Evolução da coloração da casca e polpa.....	37
Firmeza de polpa.....	37
Incidência de podridão e corte negro.....	37
Determinação de sólidos solúveis totais.....	37
Determinação de acidez titulável.....	37
Relação sólidos solúveis/acidez titulável.....	37
ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	38
DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O ₂ PARA MANTER A RESPIRAÇÃO AERÓBICA.....	39
DISCUSSÃO.....	45
DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O ₂ REQUERIDOS PARA MANTER A RESPIRAÇÃO AERÓBICA.....	45
VALIDAÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O ₂ SOB CONDIÇÕES DE ACD.....	48

CONCLUSÃO.....	51
AGRADECIMENTOS.....	51
REFERÊNCIAS.....	52
CAPÍTULO II.....	59
CONSERVAÇÃO DA QUALIDADE DE MANGAS 'PALMER' EM CONDIÇÕES DE ATMOSFERA CONTROLADA DINÂMICA.....	59
INTRODUÇÃO.....	61
MATERIAL E MÉTODOS.....	62
MATERIAL VEGETAL.....	62
DEFINIÇÃO DE NÍVEIS MÍNIMOS DE O ₂ PARA MANTER A RESPIRAÇÃO AERÓBICA.....	63
Determinação dos níveis de O ₂ , CO ₂ , etanol e quociente respiratório.....	63
Atmosfera com absorção de CO ₂	63
VALIDAÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O ₂ SOB CONDIÇÕES DE ACD.....	64
Taxa respiratória.....	65
Coloração da casca e da polpa.....	66
Determinação de sólidos solúveis totais (SST).....	66
Relação SST/AT.....	66
ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	66
RESULTADOS.....	68
NÍVEIS MÍNIMOS DE O ₂ PARA MANTER A RESPIRAÇÃO AERÓBICA DE MANGAS 'PALMER'.....	68
*Médias seguidas pela mesma letra em cada linha são estatisticamente iguais de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).....	70
VALIDAÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O ₂ SOB CONDIÇÕES DE ATMOSFERA CONTROLADA DINÂMICA (ACD).....	70
DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O ₂ PARA MANTER O METABOLISMO AERÓBICO DE MANGAS 'PALMER'.....	74
VALIDAÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O ₂ SOB CONDIÇÕES DE ATMOSFERA CONTROLADA DINÂMICA (ACD).....	76
REFERÊNCIAS.....	81
ANEXO.....	89

NÍVEIS MÍNIMOS DE OXIGÊNIO PARA A MÁXIMA INIBIÇÃO DO METABOLISMO AERÓBICO DE MANGAS 'TOMMY ATKINS' E 'PALMER' EM CONDIÇÕES DE ATMOSFERA CONTROLADA

RESUMO

Mangas têm grande importância econômica em todo o mundo, porém são caracterizadas pela sua alta perecibilidade e vida curta de prateleira. Para aumentar a vida útil dessas frutas, faz-se necessário o armazenamento refrigerado (AR), mas esse sistema pode apresentar algumas limitações, necessitando-se da adoção de outras tecnologias, como a atmosfera controlada dinâmica (ACD). Assim, a definição dos níveis mínimos de O₂ necessários para inibir ao máximo a respiração aeróbica de mangas é essencial para retardar eficientemente o amadurecimento e a senescência durante o transporte de longa distância. Os objetivos deste trabalho foram determinar o potencial de conservação pós-colheita de mangas 'Tommy Atkins' e 'Palmer' em condições de ACD. Para determinar os limites mínimos de oxigênio para a máxima inibição da respiração aeróbica das mangas, foram realizados testes em câmaras hermeticamente fechadas, semanalmente, ao longo de sete semanas a uma temperatura de 9 °C. Em seguida, os níveis mínimos seguros de O₂ encontrados para inibir a respiração aeróbica das mangas foram validados no armazenamento das mangas em condições de ACD por 60 dias a 9 °C, seguidos por mais 7 dias a 25 °C. Durante o armazenamento e vida de prateleira, os frutos foram avaliados para a taxa respiratória, produção de etanol, cor da casca e polpa, firmeza de polpa, sólidos solúveis, acidez titulável, relação sólidos solúveis/acidez titulável e incidência de podridão e desordens fisiológicas. Os níveis mínimos de O₂ variaram para mangas 'Tommy Atkins' durante o armazenamento a 9 °C, de 0,25-13,75 kPa no verão, 0,80-2,30 kPa no inverno e 1,42-17,40 kPa na primavera. Esses níveis de O₂ foram eficazes para prolongar a vida útil das mangas, controlar o escurecimento da polpa e reduzir a incidência de podridão por até 60 dias a 9 °C, seguidos por mais 7 dias a 25 °C. Para as mangas 'Palmer', os níveis mínimos de O₂ de 0,3 kPa foram observados no verão e 1,75 kPa no inverno, os quais foram eficientes no aumento da vida pós-colheita dos frutos, comparados com frutos armazenados em ambiente refrigerado a 9°C. O uso da ACD mostrou-se promissor na inibição eficiente do amadurecimento durante o armazenamento a 9 °C, comparado com o uso de AR apenas. A ACD não interferiu negativamente no processo de amadurecimento das mangas após a transferência das frutas para condições ambientais de comercialização a 25 °C.

Palavras-chave: Atmosfera controlada dinâmica; etanol; *Mangifera indica* L.

**MINIMUM O₂ LEVELS FOR MAXIMUM INHIBITION OF AEROBIC
METABOLISM OF 'TOMMY ATKINS' AND 'PALMER' MANGOES UNDER
CONTROLLED ATMOSPHERE CONDITIONS**

ABSTRACT

Although mangoes have great economic importance worldwide, the fruit are highly perishable due to high metabolic activity. In order to increase mango shelf life, refrigerated storage is necessary, which may have some limitations, requiring the adoption of other technologies, such as the dynamic controlled atmosphere (DCA). Therefore, determining the minimum levels of O₂ necessary to maximally inhibit the aerobic respiration of mangoes is essential to efficiently delay ripening and senescence during long-distance transportation. The objectives of this study were to determine the postharvest conservation potential of 'Tommy Atkins' and 'Palmer' mangoes under DCA conditions. In order to determine the minimum O₂ levels for maximum inhibition of mango aerobic respiration, tests were weekly conducted in hermetically sealed chambers over seven weeks at 9°C. Later, the safe minimum O₂ levels found to effectively inhibit mango aerobic respiration were validated by storing the fruit under DCA conditions for 60 days at 9°C, followed by 7 days of shelf life at 25°C. During storage and shelf life, the fruit were evaluated for respiration rate, ethanol production, skin and pulp color, pulp firmness, soluble solids, titratable acidity, soluble solids/titratable acidity ratio, and incidence of rot and physiological disorders. Minimum O₂ levels varied for 'Tommy Atkins' mangoes during storage at 9°C, ranging from 0.25-13.75 kPa in the summer, 0.80-2.30 kPa in the winter, and 1.42-17.40 kPa in spring growing seasons. These O₂ levels were effective in extending the postharvest life of mangoes, inhibiting black flesh and rot incidences for up to 60 days at 9°C, as well as after 7 days of shelf life at 25°C. For 'Palmer' mangoes, minimum O₂ levels were found to be 0.3 kPa in summer and 1.75 kPa in winter growing seasons, which were also efficient on extending mango postharvest life, compared to control fruit kept under refrigerated conditions at 9°C. The use of DCA showed promise in efficiently inhibiting ripening during storage at 9°C, compared to refrigerated storage alone. DCA had no negative effect on mango ripening during shelf life conditions at 25°C.

Keywords: Dynamic controlled atmosphere; ethanol; *Mangifera indica* L.

INTRODUÇÃO

A manga (*Mangifera indica* L.) se destaca mundialmente como uma fruta de alto valor comercial, principalmente nas regiões tropicais, sendo a segunda fruta tropical mais cultivada e consumida no mundo. Em termos de consumo, caracteriza-se pelo seu aroma e sabor atrativos, além de um alto valor nutricional, sendo fonte de antioxidantes e de altos níveis de vitamina A e C (USDA, 2020; Ke *et al.*, 2022).

Um fator determinante na longevidade da fruta após a colheita é o tipo ou padrão respiratório apresentado por ela. A manga é considerada uma fruta climatérica, o que lhe confere uma curta vida de prateleira por apresentar no final da sua maturação um aumento da intensidade respiratória acompanhada de rápida síntese de etileno (Singh *et al.*, 2013; Ding & Zhang, 2021). Ademais, durante o processo de amadurecimento de frutas ocorrem mudanças que abrangem o desenvolvimento da cor, hidrólise do amido, acúmulo de açúcares, produção de aroma, desaparecimento de ácidos orgânicos e amolecimento da polpa (Mesa *et al.*, 2016). O comportamento pós-colheita da manga é fortemente influenciado pela cultivar, maturidade da colheita, tratamentos pós-colheita e condições de armazenamento. O prolongamento da vida útil dessa fruta se torna uma necessidade, com vistas a possibilitar maior expansão e flexibilidade de comercialização da manga, reduzindo custos de produção e perdas pós-colheita (Eshetu Abonesh *et al.*, 2019).

Diferentes tecnologias são utilizadas para manutenção da qualidade de frutas, sendo o armazenamento refrigerado a principal tecnologia pós-colheita utilizada para aumentar a vida útil da manga, uma vez que as baixas temperaturas reduzem sua atividade metabólica (Liu, 2019; Vega-Alvarez *et al.*, 2020). Contudo, dependendo da distância de transporte, apenas o uso de baixas temperaturas não é suficiente para garantir a alta qualidade da manga no mercado, sendo necessárias outras tecnologias associadas às baixas temperaturas para reduzir ainda mais a atividade metabólica e aumentar a vida pós-colheita de frutas (Ntsoane *et al.*, 2019; Vilvert *et al.*, 2022).

Associada à refrigeração, que retarda o metabolismo e a produção de etileno, a atmosfera controlada convencional (AC) é uma técnica bastante difundida para o armazenamento e transporte de frutas por longos períodos e baseia-se na utilização de baixas pressões parciais de oxigênio (pO_2) e altas de gás carbônico (pCO_2) ao longo do armazenamento e transporte da fruta, além do controle, monitoramento e redução da temperatura do ambiente (Deuchande *et al.*, 2016; Schmidt *et al.*, 2020; Weber *et al.*, 2020).

Normalmente, a concentração de O_2 recomendada mantém uma margem segura acima do ponto de compensação anaeróbico (PCA) – a concentração de oxigênio na qual a

produção de CO₂ é mínima. Abaixo do PCA, a fermentação, e não a respiração aeróbica, dominará o metabolismo da fruta, assim como pode levar a distúrbios que alteram o sabor e levam a morte dos tecidos durante o armazenamento e transporte (Kader *et al.*, 1989; Geigenberger, 2003; Fonseca & Testin, 2004; Prange, 2005; Franck *et al.*, 2007; Thewes *et al.*, 2015). Acima do PCA, a taxa de respiração aumentará rapidamente com a concentração de O₂ e, assim, causará uma senescência mais rápida da fruta. O PCA pode variar de acordo com a época de cultivo, a origem e a data de colheita das frutas, contudo, muitas vezes é mantida uma concentração de O₂ segura durante o armazenamento e transporte, mas provavelmente abaixo do ideal, resultando em mais perda de qualidade do que o esperado (Bessemans *et al.*, 2016).

Um meio passível de solucionar esses problemas é o uso da atmosfera controlada dinâmica (ACD), sistema que permite a personalização dos níveis de O₂ no início e durante o armazenamento e transporte, conforme os sinais de estresse enviados pela fruta armazenada. As frutas se adaptam a condição de estresse pelo baixo O₂ com a ativação do metabolismo anaeróbico, o que significa acúmulo de sacarose e ácidos orgânicos e desvio de piruvato para lactato e etanol (Boeckx *et al.*, 2018). Além disso, no processo de biossíntese do etileno, a ativação da ACC oxidase depende da presença de O₂ e baixos níveis de CO₂, assim, controlando a concentração de O₂ na atmosfera de armazenamento ou transporte para que a ativação da ACC oxidase seja retardada, a vida útil da fruta pode ser estendida (Zhang *et al.*, 2017a).

Portanto, baixos níveis seguros de O₂ visam proporcionar condições de armazenamento e transporte que reduzem as perdas pós-colheita de mangas em função dos processos bioquímicos, da deterioração fisiológica, do ponto de colheita ou manuseio inadequado. O objetivo deste estudo foi determinar os níveis mínimos de O₂ que sejam mais eficientes na redução do metabolismo aeróbico de mangas ‘Tommy Atkins’ e ‘Palmer’, visando garantir a oferta de frutas de alta qualidade aos consumidores e a competitividade da mangicultura brasileira em mercados distantes.

REVISÃO DE LITERATURA

CULTIVAR TOMMY ATKINS

A manga ‘Tommy Atkins’ tem origem na Flórida, sendo a variedade comercial mais cultivada no Brasil e, também, a mais exportada para os Estados Unidos. Apresenta como principais características físicas uma polpa firme e fibrosa, casca cor vermelho-escuro sobre

grande parte da fruta, com partes verdes e amarelo-laranja, tamanho médio a grande, formato oval ou oblongo (National Mango Board, 2020). Dentre as cultivares, é uma das mais valorizadas pelos países exportadores de manga, por apresentar maior resistência a danos mecânicos e longa vida pós-colheita (Nassur *et al.*, 2015). No Brasil, responde por 80% da área plantada de manga em função de sua maior resistência a pragas e doenças (Azeredo *et al.*, 2016). Segundo Zhang *et al.* (2017b), a temperatura ideal de armazenamento varia entre 10 a 13 °C, a depender das condições de cultivo e estágio de maturação fisiológica.

Estudos voltados para conservação pós-colheita de mangas ‘Tommy Atkins’ têm apresentado resultados positivos. Em condições de atmosfera modificada passiva, Costa *et al.*, (2018) revestindo as frutas com cera de carnaúba, embalando-as com plástico Xtend, sob refrigeração, mantiveram a qualidade das mangas durante o armazenamento a 12 ± 1 °C por 21 dias, resultando na redução da concentração interna de O₂, perda de massa e acidez, assim como na conservação da firmeza de polpa das frutas.

CULTIVAR PALMER

As frutas da cultivar Palmer se caracterizam por serem grandes, com peso de até 900 gramas, compridas, esverdeadas ou arroxeadas quando imaturas e muito vermelhas quando maduras, apresentando polpa amarelada e podendo atingir teor de sólidos solúveis de 19% (Oliveira *et al.*, 2010). De acordo com Modesto *et al.*, (2016), a cultivar se destaca por apresentar características nutricionais notáveis, por exemplo, altos teores de compostos antioxidantes tais como ácido ascórbico, flavonóides e polifenóis. Além disso, dentre outras cultivares comerciais, apresentam maior firmeza, favorecendo a colheita e o transporte. Conforme Nunes *et al.* (2007), a temperatura recomendada para o armazenamento de mangas ‘Palmer’ colhidas no estágio “de vez” ou com mais de 50% da casca com cor vermelha, ou amarela, sem risco da ocorrência de danos, é de 12 °C.

De acordo com Almeida *et al.* (2018), mangas ‘Palmer’, podem ser armazenadas sob atmosfera controlada contendo 5kPa O₂ e até 20 kPa CO₂, sem que haja um efeito negativo na sua qualidade, embora o baixo nível de oxigênio (5 kPa O₂) sozinho seja tão efetivo quanto a associação de ambos os gases. Teixeira e Durigan (2011) relataram que as mangas ‘Palmer’ podem ser armazenadas a 12,8 °C em atmosferas com 1-10 kPa de O₂ por até 28 dias.

FORMAS DE ARMAZENAMENTO

ARMAZENAMENTO REFRIGERADO

A refrigeração tem sido a técnica pós-colheita mais eficiente para a preservação de frutas e hortaliças. Sendo possível controlar a temperatura, a umidade relativa e a velocidade de circulação de ar das câmaras de armazenamento, fatores que afetam diretamente o metabolismo das frutas. A temperatura é bastante relevante no quesito da conservação pós-colheita, pois, temperaturas elevadas podem acelerar a respiração, também levando ao aumento da produção de etileno. Já a umidade relativa, quando em baixos níveis, pode acarretar a desidratação do produto ou, em condições contrárias, aumentar os riscos de podridão (Chitarra & Chitarra, 2005).

Em geral, o sistema de refrigeração recomendado para o armazenamento de mangas é utilizado a temperaturas mínimas de 12-13 °C, buscando evitar a incidência de desordens fisiológicas por injúria ao frio (Brecht, 2017). Chen *et al.* (2019) retratam que o armazenamento a 10 °C foi efetivo em reduzir a respiração de frutas e a produção de etileno, o que, por sua vez, reduziu o consumo de matéria orgânica e a liberação endógena de etileno, prolongando assim a vida útil das frutas. No entanto, esse padrão de temperaturas de resfriamento muitas vezes não é suficiente para impedir os processos de amadurecimento e senescência de frutas. Assim, como alternativa, é feita a colheita e o transporte de mangas com maturidade fisiológica reduzida, buscando adquirir mais tempo de prateleira e maior manutenção da firmeza das frutas sob baixas temperaturas, 7 a 11 °C, principalmente se tratando de mercados mais distantes, o que pode tornar a fruta mais suscetível a lesões por frio (Brecht, 2019).

Contudo, estudos mostraram que sob temperaturas de 8 a 10 °C, mangas mais imaturas não desenvolveram características de maturação completa (Medlicott *et al.*, 1990), o que pode ser devido a danos causados pelo frio que inibem a expressão de genes e atividades enzimáticas relacionadas ao processo de amadurecimento (Sanches *et al.*, 2021).

ATMOSFERA CONTROLADA

A atmosfera controlada consiste em uma técnica complementar ao armazenamento refrigerado de frutas, permitindo que, além da temperatura e da umidade relativa, controle-se a concentração dos gases (O₂ e CO₂) no ambiente de armazenamento. Surgindo no século XIX, o sistema de AC passou a ser utilizado em escala mundial, para o armazenamento de

diversas frutas, principalmente as de clima temperado, e também sendo empregada em contêineres, no transporte marítimo para a comercialização das mesmas em mercados distantes. A princípio, o controle de gases dentro das câmaras de armazenamento era realizado utilizando o próprio metabolismo do fruto, a partir do consumo de O_2 e a liberação de CO_2 pela atividade respiratória. Contudo, passada a década de 50, a tecnologia foi se desenvolvendo através da utilização de sensores de monitoramento, absorção e injeção dos gases dentro das câmaras de armazenamento, estabelecendo rapidamente os níveis específicos, porém estáticos, necessários para o controle da fisiologia de frutas (Brackmann, 2007; Prange, 2018).

No armazenamento em AC, o efeito das baixas pO_2 e das altas pCO_2 ocorre em diferentes pontos do metabolismo celular de frutas, como na redução da respiração, na qual o O_2 é o aceptor final de elétrons na enzima citocromo oxidase, da membrana mitocondrial, durante a respiração aeróbica. Atua de forma indireta na redução da produção de etileno, inibindo a ativação da enzima ACC oxidase, na última etapa da rota metabólica (Brackmann, 2007; Wright *et al.*, 2015). Em condições de anaerobiose, o ácido pirúvico produzido na via glicolítica não sofre o processo de oxidação, mas sim, uma descarboxilação, formando acetaldeído, CO_2 e etanol (Chitarra & Chitarra, 2005; Zhang *et al.*, 2017a).

A pressão parcial de CO_2 elevada tem efeitos sobre o processo auto inibitório pela inibição de enzimas da rota glicolítica e do ciclo dos ácidos tricarboxílicos, mais especificamente na fosfofrutoquinase, succinato desidrogenase e isocitrato desidrogenase (Liu *et al.*, 2004). O CO_2 também tem efeito na biossíntese de etileno, reduzindo a atividade da enzima ACC sintase e competindo com o etileno pelos receptores de etileno (Mathooko, 1996). De acordo com Kader (2003) a elevação de CO_2 na atmosfera para níveis em torno de 5% suprime a respiração do fruto. No entanto, níveis elevados de CO_2 podem causar distúrbios fisiológicos, estando relacionados com o tempo e a temperatura de armazenamento.

Mangas ‘Kensington Pride’ armazenadas em atmosfera controlada (AC) sob três combinações de CO_2 (3, 6 ou 9%) e um nível de O_2 (2%), bem como atmosfera normal (controle) a 13 °C, tiveram como resultado um aumento do conteúdo de β -caroteno a medida que houve um aumento da concentração de CO_2 após 35 dias de armazenamento, assim como também houve a redução dos compostos voláteis totais do aroma, monoterpenos, sesquiterpenos e compostos aromáticos da fruta madura (Lalel & Singh, 2003). Bender & Brecht (2000) relatam que a manga ‘Tommy Atkins’ produziu mais etanol quando armazenada em AC contendo 50 kPa e 70 kPa CO_2 , e a frequência respiratória era mais

intensa quando os níveis de CO₂ eram superiores a 45 kPa. Altos teores de CO₂ também podem reduzir a concentração de vitamina C de várias frutas e hortaliças (Bangerth, 1977).

De maneira geral, mangas podem ser armazenadas sob AC contendo 3-5% O₂ e 5-8% CO₂ a 13 °C, o que resultará em uma vida útil pós-colheita de 21 a 42 dias, dependendo dos estádios de maturação (Brecht, 2020). Verifica-se na literatura que a AC mostra efeitos significativos na redução da taxa de respiração, no amadurecimento e na manutenção da qualidade de frutas. Pesquisas com a cultivar Shelly, retratam que sob condições de armazenamento contendo entre 5 a 10% de O₂, houve a manutenção dos atributos de qualidade, firmeza da polpa, teor de sólidos solúveis e açúcares individuais na manga após 21 dias de armazenamento, e a diminuição de processos do amadurecimento, como a redução da perda de massa e taxa de respiração das frutas (Ntsoane *et al.*, 2019).

Conforme Almeida (2018), as mangas ‘Palmer’ podem ser armazenadas em AC contendo 5 kPa O₂ e até 20 kPa CO₂ sem efeitos negativos à sua qualidade. Estudos com frutas maduras de ‘Tommy Atkins’ e ‘Keitt’, armazenados por 14 ou 21 dias em 5 kPa O₂ mais 10 kPa CO₂ a 5 ou 8 °C manteve melhor a qualidade das frutas por 14 ou 21 dias, respectivamente, sem evidência de dano atmosférico ou injúria por frio (Bender, 2021). Mangas da cultivar Keitt não tiveram perdas significativas de qualidade durante o período de armazenamento de 6 semanas a 7 °C sob 10% CO₂ + 6% O₂ + 84% N₂ (Hailu, 2016).

A tecnologia de AC já é bem estabelecida para frutas como maçã e está em constante evolução para outras frutas. Para manga, as pesquisas continuam evoluindo, sendo necessários ajustes e aprimoramentos, uma vez que, mesmo com o uso de AC, podem ocorrer perdas significativas na qualidade das frutas, principalmente devido a desordens fisiológicas e ao amolecimento. Assim, visando à redução desses problemas durante o armazenamento, houve o desenvolvimento de uma nova tecnologia, a atmosfera controlada dinâmica (Thewes *et al.*, 2021).

ATMOSFERA CONTROLADA DINÂMICA

A atmosfera controlada dinâmica é uma nova forma de controle dinâmico dos níveis de O₂ no ambiente de armazenamento, conforme o metabolismo da fruta durante o amadurecimento (Wright *et al.*, 2012). Esta forma de armazenamento tem como princípio a redução do nível de O₂ na atmosfera de armazenamento para o mais próximo possível do limite mínimo tolerado pelas frutas, que ocorre com o início da indução da respiração anaeróbica, diferindo do princípio seguido na atmosfera controlada convencional, em que os

níveis de oxigênio são mantidos estáticos durante todo o armazenamento e estão muito acima desse limite (Weber *et al.*, 2015).

A ACD já é uma tecnologia bastante explorada para a conservação de diferentes cultivares de maçãs, tais como ‘Braeburn’ (Buchele *et al.*, 2023), ‘Maxi Gala’ (Klein *et al.*, 2020) e ‘Galaxy’ (Anese *et al.*, 2019). Contudo, nos últimos anos também vem sendo objeto de estudo em pesquisas com pêras (Torregrosa *et al.*, 2019; Deuchande *et al.*, 2016), pêssegos (Goulart *et al.*, 2022) e frutas tropicais como a banana (Pansera *et al.*, 2022). Ikwan *et al.*, (2021) verificaram resultados positivos ao armazenar mangas sob ACD por sete semanas em comparação a frutas armazenadas sob AC estática e AR, por cinco e três semanas, respectivamente.

Para evitar danos por baixos níveis de O₂, a ACD conta com um sistema de monitoramento do metabolismo das frutas, de modo não destrutivo, durante todo o período de armazenamento. Existem três formas possíveis de acompanhar e monitorar o limite crítico de O₂ e CO₂ durante o armazenamento em ACD, através do monitoramento de metabólitos (etanol) na polpa da fruta e/ou na câmara de armazenamento, por meio da fluorescência de clorofila (FC) e do quociente respiratório (QR) (Gasser *et al.*, 2010; Kopcke, 2015; Wright *et al.*, 2015). Atualmente, esses métodos de monitoramento da ACD estão em uso comercial e serão descritos a seguir.

ACD monitorada pela produção de etanol pelas frutas (ACD-ET)

O etanol é um produto bem conhecido do processo fermentativo, sendo também resultado do amadurecimento de frutas (Bender *et al.* 2000). O aumento na concentração de etanol devido ao metabolismo anaeróbico é uma das bases do sistema de atmosfera controlada dinâmica, que pode ser utilizado para controlar os níveis de O₂, com base na suposição de que o aparecimento de etanol sinaliza o ponto de compensação anaeróbico e o início da respiração anaeróbica (fermentação). O primeiro relato de aplicação bem-sucedida de controle de O₂ usando etanol foi feito por Schouten (1995).

O monitoramento do limite mínimo de O₂ através da produção de etanol pode ser realizado no *headspace* da câmara, princípio do método DCS (*dynamic control system*), tecnologia holandesa, a qual regula os níveis da pressão parcial de O₂ à medida que a concentração de etanol aumenta, para haver redução no metabolismo anaeróbico e a normalização dos teores de etanol (Veltman *et al.*, 2003; Deuchande *et al.*, 2016). Além desse método, há uma tecnologia conhecida como ILOS-Plus, comercializada pela empresa italiana

Marvil®, que consiste em um método destrutivo para determinação do etanol, a partir do suco extraído de frutas, por meio de um biossensor enzimático.

ACD monitorada pela fluorescência de clorofilas (ACD-FC)

Outra metodologia que pode ser utilizada para determinar o LMO e para monitorar os níveis de O_2 durante o armazenamento de frutas em ACD baseia-se na fluorescência de clorofila emitida após alguma condição de estresse sofrida pelo fruto. O aumento súbito de fluorescência ocorre devido à incapacidade da transferência da energia luminosa captada pelas clorofilas para os centros ativos de reação (Prange *et al.*, 2007; Ustin, 2009; Taiz *et al.*, 2017).

Em termos práticos, a tecnologia consiste na instalação de sensores FIRM (*Fluorescence Interactive Response Monitor*) em uma caixa plástica com uma amostra de seis frutas, alocada no interior da câmara. Quando as frutas estão sob estresse por exposição a baixas pressões parciais de O_2 , a clorofila presente na epiderme das mesmas responde à luz vermelha emitida pelos LEDs, emitindo fluorescência, detectada pelo sensor, que transforma o sinal em um gráfico por meio de um *software* específico (Tran *et al.*, 2015). A partir desse momento, o O_2 é incrementado em 0,2%, contudo a pressão parcial da câmara não deverá ser menor que 0,4%, sendo mantido este nível até o final do armazenamento ou até que um novo pico de fluorescência seja detectado, quando o nível de O_2 deve ser novamente ajustado (Prange *et al.*, 2007; Tran *et al.*, 2015).

Todavia, segundo Thewes *et al.* (2021), a magnitude do sinal de fluorescência da clorofila diminui ao longo do período de armazenamento, havendo uma adaptação por parte do fotossistema II, principal responsável pela fluorescência, às novas condições. Além disso, a degradação da clorofila, como processo normal de amadurecimento da fruta, leva, consequentemente, a uma menor emissão de fluorescência.

ACD monitorada pelo quociente respiratório (ACD-QR)

O método do quociente respiratório (QR) monitora o metabolismo anaeróbico de frutas pela razão entre CO_2 produzido e O_2 consumido ($QR=CO_2/O_2$) pelas frutas acondicionadas em uma câmara hermeticamente fechada, determinado num intervalo de 13 horas (Weber *et al.*, 2015; Thewes *et al.*, 2017). Em ACD-QR o LMO é alcançado pela resposta do fruto, quando a produção de CO_2 excede o consumo de oxigênio, ou seja, QR

maior que aquele pré-definido, o que significa que está ocorrendo o metabolismo anaeróbico, sendo então necessário aumentar a concentração de O_2 na câmara, do contrário, diminui-se a concentração de O_2 em resposta a um QR inferior.

Assim, gradativamente a fruta adaptar-se-á a hipoxia, podendo manter o nível de O_2 próximo ao LMO durante todo o período de armazenamento, oscilando os níveis de O_2 na câmara conforme o metabolismo avaliado pelo QR, podendo alcançar níveis próximos a 0,08 kPa de O_2 no final do período de armazenamento (Brackmann, 2015). Portanto, esse método monitora instantaneamente o nível de estresse ao qual a fruta está exposta e fornece uma maneira segura de atingir os níveis mais baixos de oxigênio sem danificar a fruta. Alguns estudos avaliaram ACD – RQ e mostraram manutenção de alta qualidade após armazenamento prolongado.

ETILENO

No desenvolvimento dos frutos climatéricos, a síntese do etileno (C_2H_4) emerge como um dos fenômenos metabólicos preponderantes. Ao longo do período de armazenamento dessas frutas, este fitohormônio desempenha um papel crucial no processo de maturação, influenciando diversos aspectos, tais como a intensificação da atividade respiratória, a geração de etileno de forma autocatalítica, e as modificações na coloração, textura, aroma e sabor (OETIKER; YANG, 1995). Baseado nesse princípio, a retardação do amadurecimento e do processo de senescência das frutas está diretamente ligada à diminuição da atividade do etileno, assim como à redução da sua produção autocatalítica (CERQUEIRA *et al.*, 2009). O controle dessa produção de etileno é um elemento crucial para determinar tanto a longevidade quanto a qualidade das frutas (PALIYATH, *et al.*, 2009).

Os sistemas de absorção de etileno representam uma ferramenta valiosa na preservação da qualidade de frutas e hortaliças após a colheita, pois são capazes de retirar o etileno do ambiente de armazenamento, complementando os benefícios proporcionados pela utilização de atmosferas modificadas (ANTONIOLLI & CZERMAINSKI, 2019). Por exemplo, o permanganato de potássio, sem entrar em contato direto com o produto, atua oxidando o etileno presente no ambiente de armazenamento, reduzindo assim sua concentração (CARON, 2009). A oxidação do etileno (C_2H_4) com permanganato de potássio pode ser considerada um processo em duas etapas, onde o etileno é inicialmente oxidado em acetaldeído (CH_3CHO), que por sua vez é oxidado em ácido acético (CH_3COOH). O ácido acético pode ser ainda oxidado em dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O), e para alcançar

esta etapa final, no entanto, deve haver permanganato de potássio suficiente disponível para as reações (ZAGORY, 1995; WILLS *et al.*, 2014).

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA TEIXEIRA, G. H.; SANTOS, L. O.; CUNHA JÚNIOR, L. C.; DURIGAN, J. F. Effect of carbon dioxide (CO₂) and oxygen (O₂) levels on quality of ‘Palmer’ mangoes under controlled atmosphere storage. *Journal of food science and technology*, v. 55, n. 1, p. 145–156, 2018.
- ANTONIOLLI, L. R.; CZERMAINSKI, A. B. Extensão da conservação pós-colheita de peras ‘Yali’. Concórdia: Embrapa Uva e Vinho. Circular Técnica, v. 142, 2019.
- AZEREDO, L. P. M.; SILVA, M. S.; LIMA, A. Qualidade de Manga “Tommy Atkins” da produção Associada a Óleos Essenciais e Quitosana. *Quitosana. Rev. Brasil. Frutic. Jaboticabal*, p. 141–150, 2016.
- BANGERTH, F. Zum Einfluß des Partialdrucks verschiedener Gaskomponenten der Lageratmosphäre auf den Ascorbinsäuregehalt. *Qual. Plant*, v. 27, p. 125–133, 1977.
- BENDER, RENAR J.; BRECHT, JEFFREY K.; SARGENT, STEVEN A.; HUBER, DONALD J. Mango tolerance to reduced oxygen levels in controlled atmosphere storage. *Journal of the American Society for Horticultural Science. American Society for Horticultural Science*, v. 125, n. 6, p. 707–713, 2000.
- BENDER, RENAR JOÃO; BRECHT, JEFFREY K.; SARGENT, STEVEN A. Low storage temperature for tree ripe mangoes under controlled atmospheres with elevated CO₂ concentrations. *Journal of the science of food and agriculture*, v. 101, n. 3, p. 1161–1166, 2021.
- BESSEMANS, N.; VERBOVEN, P.; VERLINDEN, B. E.; NICOLAÏ, B. M. A novel type of dynamic controlled atmosphere storage based on the respiratory quotient (RQ-DCA). *Postharvest biology and technology*, v. 115, p. 91–102, 2016.
- BOECKX, J.; HERTOOG, M. L. A. T. M.; GEERAERD, A. H.; NICOLAÏ, B. M. Balancing between respiration and fermentation. *Acta horticulturae*, n. 1194, p. 689–694, 2018.
- BRACKMANN, A. Uso da atmosfera controlada é recente no Brasil. *Visão Agrícola, Piracicaba - SP*, n. 7, p. 50-52, 2007.

BRACKMANN, A.; WEBER, A.; BOTH, V. Co₂ partial pressure for respiratory quotient and harvestwatchtm dynamic controlled atmosphere for “galaxy” apples storage. *Acta horticulturae*, n. 1079, p. 435–440, 2015.

BRECHT, J. K. *Physiological Disorders in Fruits and Vegetables*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2019.

BRECHT, JEFFREY K.; SARGENT, STEVEN A.; KADER, ADEL A.; MITCHAM, ELIZABETH J.; MAUL, FERNANDO; BRECHT, PATRICK E.; MENOCAL, OCTAVIO. *Mango postharvest best management practices manual*. EDIS, v. 2020, n. 5, 2020.

BRECHT, J. K. Tropical fruits: Mangoes. Em: *Controlled and Modified Atmospheres for Fresh and Fresh-Cut Produce*. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 363–372.

BÜCHELE, F.; THEWES, F. R.; KHERA, K.; VOEGELE, R. T.; NEUWALD, D. A. Impacts of dynamic controlled atmosphere and temperature on physiological disorder incidences, fruit quality and the volatile profile of “Braeburn” apples. *Scientia horticulturae*, 2023.

CARON, V. C. 98 f. *Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)- Escola Superior de Agricultura ‘Luiz Alves de Queirós*. Piracicaba: [s. n.], 2009.

CERQUEIRA, T.S.; JACOMINO, A. P.; SASAKI, F. F.; AMORIM, L. Controle do amadurecimento de goiabas ‘Kumagai’ tratadas com 1-Metilciclopropeno. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 31, p. 687-692, 2009.

CHEN, L. The Effects of Low Temperature Duration on Mango Fruit Antioxidant Capacity and Quality. *Chin. Agric. Sci. Bull*, v. 35, p. 134–138, 2019.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. *Pós-colheita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio*. 2. ed. Lavras: UFLA, 2005.

COSTA, J. D. D. E. S.; FIGUEIREDO NETO, A.; ALMEIDA, F. D. E. A. C.; COSTA, M. D. E. S. Conservation of “Tommy Atkins” mangoes stored under passive modified atmosphere. *Revista Caatinga*, v. 31, n. 1, p. 117–125, 2018.

DEUCHANDE, T.; CARVALHO, S. M. P.; GUTERRES, U.; FIDALGO, F.; ISIDORO, N.; LARRIGAUDIÈRE, C.; VASCONCELOS, M. W. Dynamic controlled atmosphere for prevention of internal browning disorders in ‘Rocha’ pear. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie [Food science and technology]*, v. 65, p. 725–730, 2016.

DING, L.; ZHANG, Y. China’s Mango Industry Development Situation and Countermeasures. *J. Yunnan Agric. Univ. (Soc. Sci.)*, v. 2021, p. 65–69, [s.d.].

DOS SANTOS NETO, J. P.; DE CARVALHO, L. C.; LEITE, G. W. P.; JÚNIOR, L. C.; GRATÃO, P. L., DE FREITAS, S. T.; DE ALMEIDA TEIXEIRA, G. H. Postharvest behavior of mangoes nondestructively sorted based on dry matter content during and after storage under controlled atmosphere. *Fruits*, p. 294–302, 2019.

ESHETU, A.; IBRAHIM, A. M.; FORSIDO, S. F.; KUYU, C. G. Effect of beeswax and chitosan treatments on quality and shelf life of selected mango (*Mangifera indica* L.) cultivars. *Heliyon*, 5(1), e01116. 2019.

FRANCK, C.; LAMMERTYN, J.; HO, Q. T.; VERBOVEN, P.; VERLINDEN, B.; NICOLAÏ, B. M. Browning disorders in pear fruit. *Postharvest biology and technology*, v. 43, n. 1, p. 1–13, 2007.

FONSECA, J. M.; TESTIN, R. F. The anaerobic compensation point for fresh-cut watermelon and implications for postprocess handling. *HortScience*, 39 (2004), pp. 562-566.

GASSER, F.; EPPLER, T.; NAUNHEIM, W.; GABIOUD, S.; BOZZI NISING, A. Dynamic ca storage of apples: Monitoring of the critical oxygen concentration and adjustment of optimum conditions during oxygen reduction. *Acta horticulturae*, n. 876, p. 39–46, 2010.

GEIGENBERGER, P. Response of plant metabolism to too little oxygen *Curr. Curr. Opin. Plant Biol*, v. 6, p. 247–256, 2003.

GOULART, C.; CANTILLANO, R. F. F.; AGUIAR, G. A.; KIRINUS, M. B. M.; DE MELLO-FARIAS, P. C.; MALGARIM, M. B. Conservação de pêssegos cv. Jubileu em sistema refrigerado convencional, atmosfera controlada e dinâmica. *Semina: Ciências Agrárias*, 43(4), 1737-1756, 2022.

HAILU, Z. Effects of controlled atmosphere storage and temperature on quality attributes of mango. *Journal of chemical engineering & process technology*, v. 07, n. 05, 2016.

IKWAN, W. W. M. Dynamic controlled atmosphere storage technique by means of chlorophyll fluorescence extends storage life of Chokanan mango. *J. Trop. Agric. and Fd. Sc.*, v. 49, n. 1, p. 0–0, 2021.

KADER, A. A. (ED.). *Postharvest Technology of Horticultural Crops*. 3 ed. Division of Agricultural and Natural Resources. Oakland: [s.n.] 2003.

KE, Y., DAI, T., XIAO, M., CHEN, M., LIANG, R., LIU, W., & DENG, L. Industry-scale microfluidizer system produced whole mango juice: Effect on the physical properties, microstructure and pectin properties. *Innovative food science & emerging technologies: IFSET: the official scientific journal of the European Federation of Food Science and Technology*, v. 75, n. 102887, p. 102887, 2022.

KLEIN, B. Maxi Gala'e 'Elstar': consequências no metabolismo e qualidade do fruto após o armazenamento. [s. d.]

KÖPCKE, D. 1-Methylcyclopropene (1-MCP) and dynamic controlled atmosphere (DCA) applications under elevated storage temperatures: Effects on fruit quality of “Elstar”, “Jonagold” and “Gloster” apple (*Malus domestica* Borkh). *European journal of horticultural science*, p. 25–32, 2015.

LALEL, H. J. D.; SINGH, Z.; TAN, S. C. Elevated levels of CO₂ in controlled atmosphere storage affects shelf life, fruit quality and aroma volatiles of mango. *Acta horticulturae*, n. 628, p. 407–413, 2003.

LIU, S.; YANG, Y.; MURAYAMA, H.; TAIRA, S.; FUKUSHIMA, T. Effects of CO₂ on respiratory metabolism in ripening banana fruit. *Postharvest biology and technology*, v. 33, n. 1, p. 27–34, 2004.

LIU, B.; JIAO, W.; WANG, B.; SHEN, J.; ZHAO, H.; JIANG, W. Near freezing point storage compared with conventional low temperature storage on apricot fruit flavor quality (volatile, sugar, organic acid) promotion during storage and related shelf life. *Scientia Horticulturae* 2019, 249, 100–109.

MATHOOKO, F. M. Regulation of respiratory metabolism in fruits and vegetables by carbon dioxide. *Postharvest biology and technology*, v. 9, n. 3, p. 247–264, 1996.

MEDLICOTT, A. P.; SIGRIST, J.M.M.; SY, O. Ripening of mangoes following low temperature storage. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, Alexandria, v.115, n.2, p.430-434, 1990.

MESA, K.; SERRA, S.; MASIA, A.; GAGLIARDI, F.; BUCCI, D. Musacchi Seasonal trends of starch and soluble carbohydrates in fruits and leaves of ‘Abbé Fétel’ pear trees and their relationship to fruit quality parameters. *Scientia Horticulturae*, v. 211, p. 60–69, 2016.

MODESTO, J. H.; LEONEL, S.; SEGANTINI, D. M.; AZÊVEDO SOUZA, J. M.; FERRAZ, R. A.; Qualitative attributes of some mango cultivars fruits. *Australian journal of crop science*, v. 10, n. 04, p. 565–570, 2016.

National Mango Board (NMB), 2022. Mango Postharvest Best Management Practices. <https://www.mango.org/professionals/industry/improving-mangoquality/production-postharvest-best-practices/>. Acesso em: mar. 2023.

NASSUR, R.C.; RESENDE, M.; GONZÁLEZ-MOSCOSO, S.; CRISOSTO, G.M.; LIMA, L.C.O.; VILAS BOAS, E.V.B.; CRISOSTO, C.H. (2015). Describing quality and sensory attributes of mango (*Mangifera indica* L.) cultivars at ripeness stages based on firmness. *Journal of Food Science*, 80, S20551–S2063. doi:10.1111/1750-3841.12989

NTSOANE, M. L.; LUCA, A.; ZUDE-SASSE, M.; SIVAKUMAR, D.; MAHAJAN, P. V. Impact of low oxygen storage on quality attributes including pigments and volatile compounds in ‘Shelly’ mango. *Scientia horticulturae*, v. 250, p. 174–183, 2019.

NUNES, M. C. N., EMOND, J. P., BRECHT, J. K., DEA, S., & PROULX, E. Quality curves for mango fruit (CV. Tommy Atkins and Palmer) stored at chilling and nonchilling temperatures. *Journal of food quality*, v. 30, n. 1, p. 104–120, 2007.

OLIVEIRA ANESE, R.; BRACKMANN, A.; WENDT, L. M.; THEWES, F. R.; SCHULTZ, E. E.; LUDWIG, V.; BERGHETTI, M. R. P. Interaction of 1-methylcyclopropene, temperature and dynamic controlled atmosphere by respiratory quotient on ‘Galaxy’ apples storage. *Food packaging and shelf life*, v. 20, 2019.

OLIVEIRA, A. R. et al. Cultivo da mangueira. [s.l.] Sistemas de Produção, 2010.

OETIKER, J.H.; YANG, S.F. The role of ethylene in fruit ripening. *Acta Horticulturae*, Wellington, n. 398, p. 167-178, 1995.

PANSERA-ESPÍNDOLA, B.; MARCELINO, R.; CROTTI, Y. Controlled atmosphere and dynamic controlled atmosphere for Fuzzy logic-based banana storage: Atmosfera controlada e atmosfera controlada dinâmica baseadas em lógica Fuzzy para o armazenamento de bananas. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 12, p. 77544–77564, 2022.

PALIYATH, G.; MURR, D. P.; HANDA, A. K.; LURIE, S. Postharvest biology and technology of fruits, vegetables, and flowers. John Wiley & Sons, 2009.

PRANGE, R. K. Dynamic controlled atmosphere (DCA) storage of fruits and vegetables. Em: *Reference Module in Food Science*. [s.l.] Elsevier, 2018.

PRANGE, R. K.; DeLONG, J. M.; DANIELS-LAKE, B. J.; HARRISON, P. A. Innovation in controlled atmosphere technology. *Stewart Postharvest Review*, v. 1, n. 3, p. 1-11, 2005.

SANCHES, A. G.; PEDROSA, V. M. D.; CHECCHIO, M. V.; FERNANDES, T. F. S.; MAYORQUIN GUEVARA, J. E.; GRATÃO, P. L.; TEIXEIRA, G. H. D. A. Polyols can

alleviate chilling injury in ‘Palmer’ mangoes during cold storage. *Food Control*, 2021, 129, 108248. *Scientia Horticulturae*, v.317, 2021.

SCHMIDT, S. F. P.; SCHULTZ, E. E.; LUDWIG, V.; BERGHETTI, M. R. P.; THEWES, F. R.; DE OLIVEIRA ANESE, R.; BRACKMANN, A. Volatile compounds and overall quality of ‘Braeburn’ apples after long-term storage: Interaction of innovative storage technologies and 1-MCP treatment. *Scientia horticulturae*, 2020.

SCHOUTEN, S. P.; PRANGE, R. K.; VERSCHOOR, J.; LAMMERS, T. R.; OOSTERHAVEN, J. Improvement of quality of Elstar apples by dynamic control of ULO conditions. (1997).

SINGH, Z.; SINGH, R. K.; SANE, V. A.; NATH, P. Mango-postharvest biology and biotechnology. *Critical Reviews in Plant Sciences*, n. 4, p. 217–236, 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TEIXEIRA, G. H. DE A.; DURIGAN, J. F. Storage of ‘Palmer’ mangoes in low-oxygen atmospheres. *Fruits*, v. 66, n. 4, p. 279–289, 2011.

THEWES, F. R.; BOTH, V.; BRACKMANN, A.; WEBER, A.; ANESE, R. Dynamic controlled atmosphere and ultralow oxygen storage on ‘Gala’mutants quality maintenance. *Food Chemistry*, v. 188, p. 62–70, 2015.

THEWES, F. R.; WOOD, R. M.; BOTH, V.; KESHRI, N.; GEYER, M.; PANSERA-ESPÍNDOLA, B.; HAGEMANN, M. H.; BRACKMANN, A.; WÜNSCHE, J. N.; NEUWALD, D. A. Dynamic controlled atmosphere: A review of methods for monitoring fruit responses to low oxygen. *Comunicata Scientiae*, v., 12, 2021.

TORREGROSA, L.; ECHEVERRIA, G.; ILLA, J.; GINÉ-BORDONABA, J. Ripening behaviour and consumer acceptance of ‘Conference’pears during shelf life after long term DCA-storage. *Postharvest Biology and Technology*, v. 155, p. 94–101, 2019.

TRAN, D. T. Monitoring of extremely low oxygen control atmosphere storage of ‘Greenstar’ apples using Chlorophyll Fluorescence. *Scientia Horticulturae*, v. 184, p. 18–22, 2015.

United States Department Of Agriculture. Agricultural Research Service. USDA national nutrient database for standard reference. v. 25, [s.d.].

USTIN, S. L.; GITELSON, A. A.; JACQUEMOUD, S.; SCHAEPMAN, M.; ASNER, G. P.; GAMON, J. A.; ZARCO-TEJADA, P. Retrieval of foliar information about plant pigment systems from high resolution spectroscopy. *Remote sensing of environment*, v. 113, p. S67–S77, 2009.

VEGA-ALVAREZ, M.; SALAZAR-SALAS, N. Y.; LÓPEZ-ANGULO, G.; PINEDA-HIDALGO, K. V.; LÓPEZ-LÓPEZ, M. E.; VEGA-GARCÍA, M. O.; DELGADO-VARGAS, F.; LÓPEZ-VALENZUELA, J. A. Metabolomic changes in mango fruit peel associated with chilling injury tolerance induced by quarantine hot water treatment. *Postharvest biology and technology*, v. 169, n. 111299, p. 111299, 2020.

VELTMAN, R. H.; VERSCHOOR, J. A.; RUIJSCH VAN DUGTEREN, J. H. Dynamic control system (DCS) for apples (*Malus domestica* Borkh. cv. ‘Elstar’): optimal quality through storage based on products response. *Postharvest Biol. Technol.*, v. 27, n. 1, p. 79–86, 2003.

VILVERT, J. C.; DE FREITAS, S. T.; FERREIRA, M. A. R.; LEITE, R. H. de L.; DOS SANTOS, F. K. G.; COSTA, C. dos S. R.; AROUCHA, E. M. M. Chitosan and graphene oxide-based biodegradable bags: An eco-friendly and effective packaging alternative to maintain postharvest quality of ‘Palmer’ mango. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie [Food science and technology]*, v. 154, n. 112741, p. 112741, 2022.

WEBER, A.; BRACKMANN, A.; BOTH, V.; PAVANELLO, E. P.; ANESE, R. de O.; THEWES, F. R. Respiratory quotient: innovative method for monitoring ‘Royal Gala’ apple storage in a dynamic controlled atmosphere. *Scientia agricola*, v. 72, n. 1, p. 28–33, 2015

WEBER, A.; NEUWALD, D. A.; KITTEMANN, D.; THEWES, F. R.; BOTH, V.; BRACKMANN, A. Brackmann Influence of respiratory quotient dynamic controlled

atmosphere (DCA - RQ) and ethanol application on softening of Braeburn apples. Food Chem. v. 303, 2020.

WILLS, R. B. H.; HARRIS, D. R.; SPOHR, L. J.; GOLDING, J. B. Reduction of energy usage during storage and transport of bananas by management of exogenous ethylene levels. Postharvest biology and technology, v. 89, p. 7–10, 2014.

WRIGHT, A. H.; DELONG, J. M.; GUNAWARDENA, A. H.; PRANGE, R. K. Dynamic controlled atmosphere (DCA): Does fluorescence reflect physiology in storage? Postharvest Biology and Technology, v. 64, p. 13-30, 2012.

WRIGHT, A. H.; DELONG, J. M.; ARUL, J.; PRANGE, R. K. The trend toward lower oxygen levels during apple (*Malus × domestica* Borkh) storage. The journal of horticultural science & biotechnology, v. 90, n. 1, p. 1–13, 2015.

ZAGORY, D. Ethylene-removing packaging. Active Food Packaging. Boston, MA: Springer US, 1995. p. 38–54.

ZHANG, J.; CHENG, D.; WANG, B.; KHAN, I.; NI, Y. Ethylene control technologies in extending postharvest shelf life of climacteric fruit. Journal of agricultural and food chemistry, v. 65, n. 34, p. 7308–7319, 2017a.

ZHANG, Z.; ZHU, Q.; HU, M.; GAO, Z.; AN, F.; LI, M.; JIANG, Y. Low-temperature conditioning induces chilling tolerance in stored mango fruit. Food chemistry, v. 219, p. 76–84, 2017b.

CAPÍTULO I

NÍVEIS MÍNIMOS DE O₂ DURANTE O ARMAZENAMENTO PARA INIBIR A RESPIRAÇÃO AERÓBICA E PROLONGAR A VIDA PÓS-COLHEITA DE MANGAS 'TOMMY ATKINS' PRODUZIDAS EM DIFERENTES ÉPOCAS NO VALE DO SÃO FRANCISCO

RESUMO

A definição dos níveis mínimos de O₂ necessários para inibir ao máximo a respiração aeróbica de frutas é essencial para retardar eficientemente o amadurecimento e a senescência durante o transporte das frutas por longas distâncias. O objetivo deste estudo foi determinar os níveis mínimos de O₂ necessários para inibir ao máximo a respiração aeróbica e prolongar a vida pós-colheita de mangas 'Tommy Atkins' produzidas durante diferentes épocas de cultivo na região do Submédio do Vale do São Francisco (SVSF), Brasil. Para a identificação dos níveis mínimos de O₂, as mangas foram armazenadas durante 42 dias a 9 °C e 90-95% UR. A mudança do metabolismo aeróbico para anaeróbico foi determinada semanalmente com base nos níveis de produção de O₂, CO₂ e etanol dentro de recipientes hermeticamente fechados contendo amostras de frutas. A fim de validar os níveis mínimos de O₂ para manter a respiração aeróbica e a qualidade de frutas, as mangas 'Tommy Atkins' foram colhidas na maturidade comercial na estação de crescimento de inverno, no ano seguinte, e foram armazenadas em condições de atmosfera controlada dinâmica (ACD) com os níveis mínimos de O₂ determinados no experimento do ano anterior. As frutas armazenadas sob ACD foram comparadas com as frutas armazenadas em atmosfera refrigerada (AR) durante 60 dias a 9 °C e 90-95% RH, com avaliações aos 0, 15, 30, 45 e 60 dias. Para simular a vida de prateleira, as frutas foram mantidas a 25 °C por mais 7 dias. Segundo os resultados obtidos, os níveis mínimos de O₂ necessários para manter a respiração aeróbica das mangas produzidas no verão, inverno e primavera variaram de 0,25 a 13,75 kPa, 0,80 a 2,30 kPa e 1,42 a 17,40 kPa, respectivamente, à medida que o período de armazenamento aumentou. Os níveis mínimos de O₂ utilizados no armazenamento em ACD retardaram efetivamente os processos do amadurecimento, assim como inibiram a incidência de corte negro e podridão durante 60 dias de armazenamento a 9 °C mais 7 dias de vida de prateleira a 25 °C.

Palavras-chave: Atmosfera controlada; *Mangifera indica* L.; limite mínimo de O₂; respiração.

**MINIMUM O₂ LEVELS DURING STORAGE TO INHIBIT AEROBIC
RESPIRATION AND PROLONG THE POSTHARVEST LIFE OF 'TOMMY
ATKINS' MANGOES PRODUCED IN DIFFERENT GROWING SEASONS**

ABSTRACT

The definition of the minimum levels of O₂ required to maximally inhibit aerobic respiration is essential to efficiently delay ripening and senescence during long-distance transportation. The aim of this study was to determine the minimum levels of O₂ required to maximize the inhibition of aerobic respiration and prolong the postharvest life of 'Tommy Atkins' mangoes produced during different growing seasons in the São Francisco Valley, Brazil. In order to identify the minimum O₂ levels, mangoes were stored for 42 days at 9°C and 90-95% RH. The change from aerobic to anaerobic metabolism was determined weekly based on the levels of O₂, CO₂, and ethanol production within hermetically sealed containers containing fruit samples. In order to validate the minimum O₂ levels to maintain aerobic respiration and fruit quality, 'Tommy Atkins' mangoes were harvested at commercial maturity during the winter growing season and were stored under dynamic controlled atmosphere (DCA) with the minimum O₂ levels determined in the previous year's experiment. Fruit stored under DCA was compared with fruit stored in refrigerated atmosphere (RA) for 60 days at 9°C and 90-95% RH, with evaluations at 0, 15, 30, 45, and 60 days. To simulate shelf life condition, the fruits were stored at 25°C for an additional 7 days. During storage and shelf life, fruit were evaluated for pulp firmness, skin and pulp color, soluble solids, titratable acidity, as well as rot and black flesh incidences. The minimum O₂ levels required to maintain aerobic respiration of mangoes produced in summer, winter, and spring growing seasons ranged from 0.25 to 13.75 kPa, 0.80 to 2.30 kPa, and 1.42 to 17.40 kPa, respectively, as the storage duration increased. The minimum O₂ levels used in DCA effectively delayed ripening, as well as inhibited the incidence of black flesh and rot during 60 days of storage at 9 °C plus 7 days of shelf life at 25 °C.

Keywords: Controlled atmosphere; *Mangifera indica* L.; minimum O₂ limit; respiration.

INTRODUÇÃO

A manga ‘Tommy Atkins’ representa cerca de 75% da área cultivada total desta frutífera no Brasil, que tem sido amplamente produzida devido à sua alta aceitação no mercado global, alta produtividade e cor intensa, além de conservação satisfatória da vida útil pós-colheita. Apresenta como características físico-químicas, casca predominantemente avermelhada, polpa carnosa e succulenta com sabor e aroma bem característico, sendo rica em nutrientes como betacaroteno, vitaminas C, A, E e minerais, além de consideráveis teores de compostos fenólicos (Singh & Zahara, 2015; Araújo *et al.*, 2017).

Com a expansão contínua do mercado consumidor, a forma de consumo da manga gradualmente se transformou de vendas locais e periféricas para modos de vendas externas e de exportação. Contudo, devido ao comportamento de amadurecimento climatérico e práticas inadequadas de manejo após a colheita, a manga apresenta um curto período de vida útil, fator que pode restringir seu potencial de exportação a mercados distantes das regiões produtoras (Ayele & Bayleyegn, 2017; Liu *et al.*, 2019).

O controle de temperatura através do armazenamento refrigerado é uma técnica simples e muito utilizada para prolongar a vida útil de frutas, estendendo o período de comercialização e transporte dos mesmos. Em mangas ‘Apple’ e ‘Kent’, o armazenamento refrigerado a 10 °C por 21 dias apresentou significativa redução na perda de peso, de apenas 2,15%, em comparação com o armazenamento em temperatura ambiente (7,31%) (Ayele & Bayleyegn, 2017). No entanto, apenas o uso de baixas temperaturas não é eficiente quando se trata de longos períodos de armazenamento ou transporte (Bender *et al.*, 2021). Desta forma, tecnologias que complementam o sistema de refrigeração e retardam o processo de amadurecimento de frutas vêm sendo utilizadas, tais como atmosfera modificada e atmosfera controlada (Almeida, 2018).

A atmosfera controlada, por meio do controle dos níveis de O₂ e CO₂ nas câmaras de armazenamento, mostra efeitos significativos na redução da taxa de respiração, no amadurecimento e na manutenção da qualidade de frutas, confirmando ser uma tecnologia promissora para exportar mangas para mercados distantes usando o transporte marítimo (Singh & Zaharah, 2015). Conforme Brecht (2020), mangas podem ser armazenadas em ambiente contendo 3–5% O₂ e 5–8% CO₂ a 13 °C, visando a extensão da vida pós-colheita, a depender da cultivar e estágio de maturação. Mangas ‘Tommy Atkins’ armazenadas por 10 dias em AC com concentrações de 3% O₂ + 10% CO₂ com e sem tratamento térmico (46,1 °C por 75 min) não foram afetadas quanto aos seus teores de ácido gálico, taninos hidrolisáveis e

seus antioxidantes, mas os polifenólicos diminuíram durante o amadurecimento da fruta (Kim *et al.*, 2007).

Para otimizar o ambiente gasoso de armazenamento de frutas, o conhecimento do limite mínimo de oxigênio (LMO) é de suma importância, pois é onde a respiração aeróbica se encontra no nível mais baixo que pode ser alcançado sem o desenvolvimento do metabolismo anaeróbico. Portanto, conhecendo o limite mínimo de O₂, é possível reduzir ao máximo a respiração do fruto, sem permitir que este entre no processo de respiração anaeróbica que levará a fruta à fermentação (Thewes *et al.*, 2021b).

A ACD é um método de armazenamento, em que é possível monitorar em tempo real o metabolismo do fruto. Existem diferentes formas para realizar esse monitoramento, uma delas é através do produto da respiração anaeróbica, o etanol. Assim, os níveis de oxigênio vão sendo reduzidos até a produção de etanol ser detectada, como resultado do início do processo fermentativo, podendo este ser determinado no *headspace* da câmara ou no suco obtido da fruta (Veltman *et al.*, 2003; Thewes *et al.*, 2021a).

Buscando proporcionar condições de armazenamento que reduzem as perdas pós-colheita de mangas em função dos processos bioquímicos, da deterioração fisiológica, do ponto de colheita ou manuseio inadequado, o objetivo do estudo foi identificar e definir níveis mínimos de O₂ para inibir ao máximo a respiração aeróbica e prolongar a vida pós-colheita de mangas ‘Tommy Atkins’ produzidas em diferentes safras no Vale do São Francisco.

MATERIAL E MÉTODOS

MATERIAL VEGETAL E CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

O experimento foi realizado com mangas ‘Tommy Atkins’ (*Mangifera indica* L.) colhidas em um pomar comercial localizado no Submédio do Vale do São Francisco, em Petrolina-PE, Brasil (latitude 9°03'04,6"S, longitude 40°17'46,5"O), nas safras de verão (2021), inverno (2021) e primavera (2022) em maturidade fisiológica, cujo peso médio das frutas variou de 0,475 a 0,550 g, caracterizada por ombros cheios na extremidade do caule e verde-claro predominante na cor da casca (National Mango Board, 2010). Os pomares comerciais utilizados no estudo foram submetidos às mesmas práticas de manejo em todas as épocas de cultivo, segundo as recomendações técnicas.

Após a colheita, as frutas foram levadas para o Laboratório de Tecnologia Pós-Colheita da EMBRAPA SEMIÁRIDO, Petrolina-PE, Brasil, e foram lavadas e selecionadas quanto ao tamanho, cor, uniformidade, peso e ausência de doenças e injúrias. Posteriormente, foram acondicionadas em caixas de papelão e armazenadas a 9 °C ($\pm 0,5$ °C) e 90-95% UR por 42 dias, simulando as condições comerciais do transporte marítimo para longas distâncias. O experimento consistiu em quatro repetições contendo 21 frutas cada. As mesmas foram submetidas a análises físico-químicas semanais durante seis semanas, resultando na avaliação de 84 frutas por semana e 504 frutas em cada época de cultivo.

DEFINIÇÃO DE NÍVEIS MÍNIMOS DE O₂ PARA MANTER A RESPIRAÇÃO AERÓBICA

No dia da colheita e a cada sete dias de armazenamento, amostra de 21 frutas foi colocada numa câmara de polietileno de 20 L, hermeticamente fechada, com septos de borracha e um mini-ventilador para homogeneização do ar. No interior de cada câmara, foram colocados dois sachês de 20 g de permanganato de potássio (99%) para absorver o etileno produzido pelas frutas. Após o fechamento das câmaras, o O₂ interno foi gradualmente reduzido devido à respiração das frutas. Após 16 h, a pressão parcial de O₂ (pO_2), a pressão parcial de CO₂ (pCO_2) e a concentração de etanol foram monitoradas de hora a hora até a identificação de etanol na atmosfera, indicativo de mudança de respiração aeróbica para anaeróbica.

Todas as análises foram realizadas semanalmente durante o armazenamento com diferentes amostras de frutas. Os valores mínimos de O₂ e CO₂ no exato momento da transição da respiração aeróbia para a anaeróbia foram estimados com uma regressão linear.

Determinação de níveis de O₂, CO₂, quociente respiratório e etanol

A pO_2 e a pCO_2 foram determinadas com um analisador de gases PA 7.0 (WITT-Gasetechnik GmbH & Co KG, Alemanha). A concentração de etanol foi quantificada com um analisador de gases portátil Dräger X-am 5000 (Dräger, Alemanha); os resultados foram expressos em $\mu\text{L L}^{-1}$. A taxa de respiração foi avaliada pela produção de CO₂ durante as duas primeiras horas em que as frutas permaneceram fechadas nas câmaras de 20 L. A taxa de produção de CO₂ foi expressa em $\text{mg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$. O quociente respiratório (QR) foi calculado através da razão entre a produção de CO₂ e o consumo de O₂ no interior das câmaras.

Atmosfera com absorção de CO₂

A pO_2 mínima no início da síntese de etanol pela fruta foi também determinada em condições de absorção de CO₂, com a inserção de dois sachês de 150 g de hidróxido de cálcio no interior de cada câmara. Nestas condições, a pO_2 e a produção de etanol foram monitoradas como acima referido. A condição de atmosfera com absorção de CO₂ foi estabelecida após a análise das câmaras sem absorção de CO₂.

VALIDAÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O₂ SOB CONDIÇÕES DE ATMOSFERA CONTROLADA DINÂMICA (ACD)

As mangas ‘Tommy Atkins’ de tamanho médio (0,475 a 0,550 g) produzidas na época de inverno de 2022 foram colhidas na maturidade comercial. Após a colheita, as frutas foram lavadas e homogeneizadas com base no tamanho, cor, uniformidade, peso e ausência de doenças e injúrias. As mesmas foram então armazenadas a 9 °C ($\pm$ 0,5 °C) e 90-95% UR por 60 dias sob atmosfera refrigerada (AR) ou atmosfera controlada dinâmica (ACD). Cada condição de armazenamento foi composta por quatro repetições com 24 frutas por repetição.

As frutas armazenadas sob AR foram colocadas em bandejas plásticas, enquanto as armazenadas sob ACD foram colocadas em câmaras de polietileno hermeticamente fechadas de 20L. Cada amostra tinha 150 g de permanganato de potássio (99%) e 100 g de hidróxido de cálcio para absorver etileno e CO₂, respectivamente.

A ACD foi estabelecida e mantida com um sistema de fluxo contínuo umidificado a 500 mL min⁻¹. O ar comprimido foi a fonte de O₂ (21%) e o cilindro de gás de alta pureza (99,99%) (White Martins gases Industriais Ltda., Brasil) foi a fonte de N₂. Ambos os gases foram misturados para obter os níveis de O₂ necessários para o armazenamento do ACD. O fornecimento e a composição dos gases no interior das câmaras foram monitorados duas vezes por dia durante o armazenamento, utilizando os analisadores de gases acima mencionados (Fig. 1). No início do armazenamento em ACD, o nível seguro estabelecido foi de 1,3 kPa, o qual foi determinado como a média (1,2 kPa) mais 10% (0,1 kPa) dos valores mínimos de O₂ observados na colheita em frutas produzidas na mesma época de cultivo no ano anterior, 2021. Esta determinação foi usada para garantir a respiração aeróbica em todas as amostras de frutas, porque leva em conta a variabilidade de 10% entre amostras observadas no estudo anterior acima descrito.

Durante o armazenamento, O_2 foi mantido no nível mais baixo seguro devido à menor e benéfica produção de etanol, mantida abaixo do valor recomendado de $500 \mu\text{L L}^{-1}$ (Weber *et al.*, 2020; Thewes *et al.*, 2021b). As análises de frutas foram realizadas a 0, 15, 30, 45 e 60 dias de armazenamento e posteriormente aos sete dias de vida de prateleira a 25°C ($\pm 0,5^\circ\text{C}$) e 90-95% RH, como descrito abaixo.

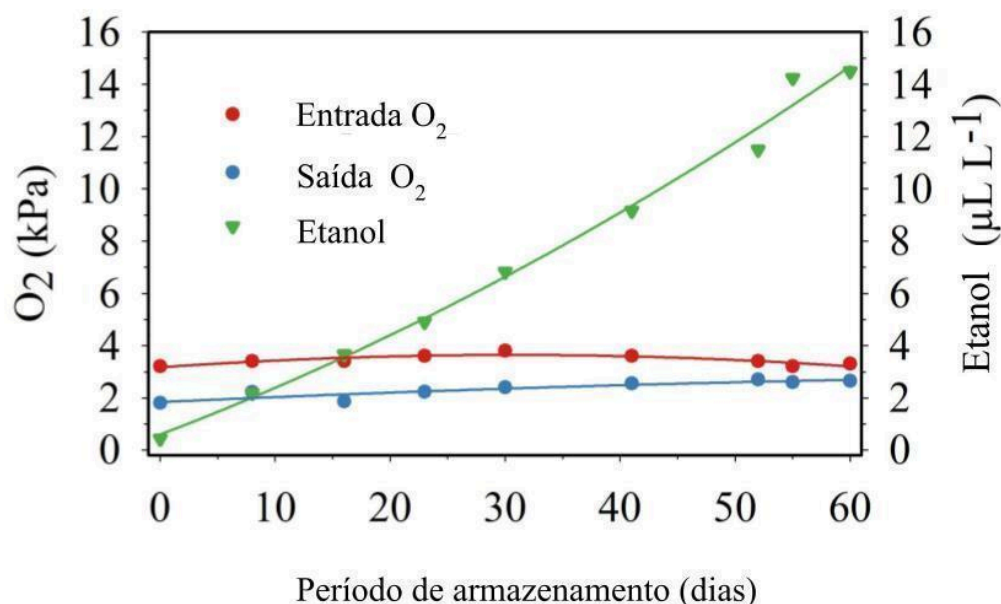


Figura 1. Entrada e saída de níveis de O_2 e concentração de etanol em câmaras de atmosfera controlada dinâmica utilizadas para armazenar mangas ‘Tommy Atkins’ por 60 dias a 9°C ($\pm 0,5^\circ\text{C}$).

ANÁLISE DA QUALIDADE DAS FRUTAS

Taxa respiratória

A taxa de respiração foi avaliada pela produção de CO_2 durante as duas primeiras horas em que as frutas permaneceram fechadas nas câmaras de 20 L câmaras. Uma alíquota de 1 mL de gás foi retirada da atmosfera interna dos frascos, utilizando uma seringa, por meio de um septo de silicone existente no centro da tampa dos frascos, em seguida foi injetada no cromatógrafo. Os cálculos da atividade respiratória das frutas, a liberação de CO_2 e o consumo de O_2 , foram baseados na diferença entre a leitura inicial e final de cada frasco. A taxa de produção de CO_2 foi expressa em $\text{mg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$.

Evolução da coloração da casca e polpa

As frutas foram medidas de forma não destrutiva na região equatorial da fruta e na polpa da fruta cortada, com duas medições por fruta, utilizando um colorímetro digital Minolta CR 400 (Konica Minolta, Ramsey, EUA). Os valores de cor foram determinados de acordo com McGuire (1992) e foram expressos como °hue, onde 0° representa vermelho, 90° representa verde-amarelado, 180° representa o azul-turquesa e 270° representa o violeta.

Firmeza de polpa

Determinada por meio da inserção de uma ponteira de 6 mm de diâmetro na polpa das mangas, nos dois lados opostos da região equatorial, onde a epiderme foi previamente removida. O equipamento utilizado foi o texturômetro eletrônico Extralab TAXT Plus (Stable Micro Systems, Surrey, Reino Unido). Os resultados foram expressos em Newton (N).

Incidência de podridão e corte negro

Estes parâmetros foram avaliados pela multiplicação do número de mangas que apresentaram tais desordens por 100 em relação à quantidade total de mangas de cada repetição. Os dados foram expressos em porcentagem.

Determinação de sólidos solúveis totais

Os sólidos solúveis foram determinados com um refratômetro digital com compensação automática de temperatura (ATAGO, Digital Pocket Refractometer, modelo PAL-1), conforme AOAC (2012), utilizando-se para isso 1 mL de suco. A escala de leitura do equipamento usado varia de 0 a 65%.

Determinação de acidez titulável

Realizada pela titulação de 1 mL de suco da polpa diluído em 50 mL de água destilada com uma solução de NaOH 0,1 N até atingir o pH 8,1 conforme o método do Instituto Adolfo Lutz- IAL (2005). Utilizou-se um titulador automático, da marca Metrohm (modelo 848 Titrino plus). Os resultados foram expressos em porcentagem de ácido cítrico no suco.

Relação sólidos solúveis/acidez titulável

A relação SST/AT foi calculada em cada amostra dividindo o valor dos sólidos solúveis totais por seu respectivo valor de acidez titulável.

ANÁLISE ESTATÍSTICA

O estudo sobre a definição dos mínimos de O_2 para manter a respiração aeróbica de frutas seguiu um arranjo experimental inteiramente casualizado e os dados obtidos em cada estação de cultivo foram analisados separadamente. Dados das análises físico-químicas foram submetidas a uma ANOVA, e as médias de cada semana de armazenamento foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). O estudo para validar os níveis mínimos de O_2 sob condições de ACD para a manutenção da qualidade de frutas seguiu um delineamento inteiramente casualizado, em arranjo de parcelas subdivididas, com as duas condições atmosféricas na parcela e os cinco tempos de armazenamento na subparcela. As atmosferas foram comparadas em cada tempo de armazenamento pelo teste F. Os dados foram representados por médias e desvios-padrão. A transformação do arco seno dos dados percentuais foi realizada antes da aplicação da ANOVA. Todas as análises estatísticas foram efetuadas utilizando o pacote ExpDes.pt R.

RESULTADOS

DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O₂ PARA MANTER A RESPIRAÇÃO AERÓBICA

Durante o armazenamento, o padrão de redução do consumo de oxigênio de frutas de manga ‘Tommy Atkins’ foi similar nas três diferentes épocas de cultivo, assim como o aumento da produção de CO₂ e do QR (Figura 1 do anexo).

Após 2h do fechamento das câmaras, obteve-se um nível de pO_2 interno de 18,7-20,0 kPa, 18,9-19,5kPa e 19,70-20,23 kPa, enquanto a pCO_2 interna foi de 1,8-3,2 kPa, 2,0-2,7 kPa e 1,23-1,65 kPa em frutas colhidas nas épocas de cultivo de verão, inverno e primavera (Figura 2 do anexo). Quanto ao etanol, durante o mesmo período de 2h, não foi detectada a presença do mesmo no interior das câmaras (Fig. 2A, 2B, 2C). Em todas as épocas de cultivo, observou-se que na primeira semana de armazenamento, as frutas menos maduras necessitaram de mais tempo dentro da câmara selada para iniciar a produção de etanol, se comparados com as frutas com a maturação mais avançada nas últimas semanas de armazenamento (Fig. 2A, 2B, 2C).

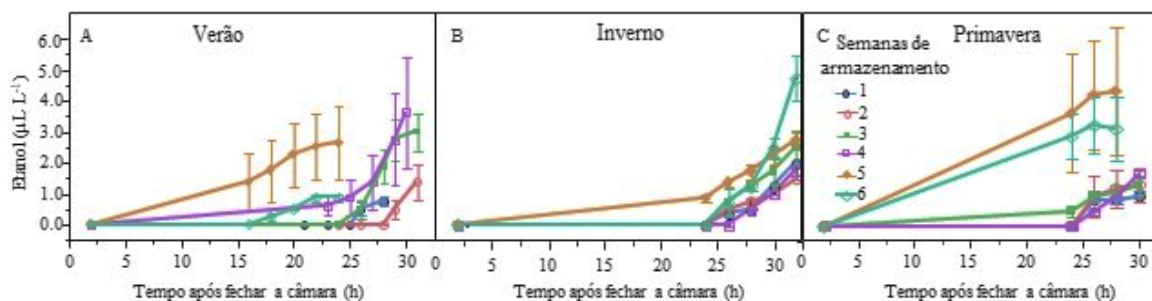


Figura 2. Concentração de etanol dentro das câmaras hermeticamente seladas com mangas ‘Tommy Atkins’ produzidas nas estações do verão (A) inverno (B) e primavera (C) e armazenadas por seis semanas a 9 °C. Os valores representam a média $\pm$ erro padrão ($n=4$).

Os menores níveis de O₂ requeridos para manter a respiração aeróbica foram 0,25, 0,32, e 2,45 kPa, nas 3^o, 2^o e 1^o semanas de armazenamento, em frutas produzidas no verão (Fig. 3A), assim como frutas da estação da primavera (Fig. 3C), apresentaram 1,69, 1,57 e 1,42 kPa, na 4^o, 3^o e 2^o semanas de armazenagem, respectivamente. Nas últimas semanas de armazenamento, os níveis mínimos de O₂ aumentaram para 13,75 kPa e 17,40 kPa em frutas produzidas no verão e primavera, respectivamente. As pressões de O₂ e CO₂ na transição da

respiração aeróbica para anaeróbica de frutas da safra de inverno, se mantiveram relativamente constantes por todo o tempo de armazenamento, sendo os mínimos de oxigênio 1,22 kPa, 1,18 kPa, 2,30 kPa, 1,79 kPa e 0,80 kPa em cada respectiva semana (Fig. 3B). A $p\text{CO}_2$ na taxa mínima de respiração aeróbica teve um comportamento oposto ao observado para O_2 .

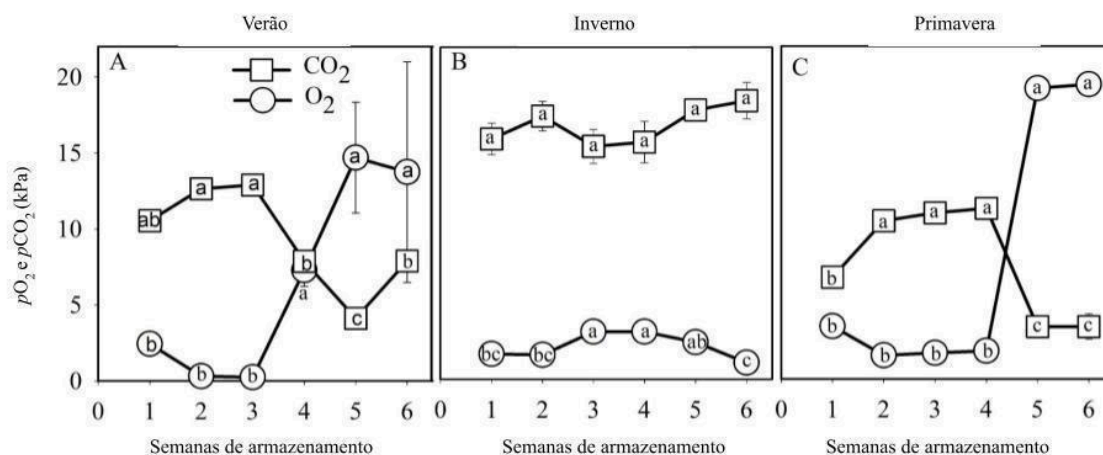


Figura 3. Pressões parciais de O_2 e CO_2 na transição da respiração aeróbica para anaeróbica de mangas ‘Tommy Atkins’ produzidas no verão (A), inverno (B) e primavera (C).

As concentrações de $p\text{O}_2$ e etanol no ambiente com absorção de CO_2 mostraram comportamento similar ao que foi observado sem os absorvedores de CO_2 . Conforme as análises físico-químicas, durante todo o armazenamento das mangas em estudo, a cor da casca e da polpa mudaram de verde e branco para amarelo, houve uma diminuição da firmeza da polpa e um aumento no conteúdo de sólidos solúveis. Quanto a acidez titulável, em frutas produzidas no verão, não houve influência do tempo de armazenamento, já em mangas da época de inverno e primavera, houve um decréscimo nos teores de acidez. A relação SS/AT aumentou 65%, 195% e 22% da primeira até a sexta semana de armazenamento em mangas produzidas no verão, inverno e primavera, respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1. Qualidade físico-química de mangas ‘Tommy Atkins’ produzidas nas épocas de cultivo de verão, inverno e primavera e armazenadas a 9 °C por seis semanas.

Características de qualidade	Tempo de armazenamento (semanas)					
	1	2	3	4	5	6
Verão						
°Hue da casca	114.29 ^{a*}	113.38 ^a	113.03 ^a	111.55 ^{ab}	107.00 ^{bc}	105.58 ^c
°Hue da polpa	103.90 ^a	101.94 ^{ab}	100.26 ^{ab}	99.84 ^{ab}	98.20 ^b	98.74 ^b
Firmeza da polpa (N)	67.49 ^a	59.63 ^{ab}	52.86 ^{ab}	58.05 ^{ab}	45.58 ^b	48.89 ^b
SS (%)	7.68 ^c	9.85 ^b	11.43 ^{ab}	12.18 ^a	12.40 ^a	12.23 ^a
AT (g 100 ⁻¹)	0.94 ^a	0.93 ^a	0.96 ^a	0.78 ^a	0.92 ^a	0.89 ^a
SS/AT	8.33 ^c	10.76 ^{bc}	11.95 ^b	15.72 ^a	13.71 ^{ab}	13.77 ^{ab}
Inverno						
°Hue da casca	114.24 ^a	108.74 ^{ab}	106.12 ^b	106.57 ^b	107.01 ^b	107.04 ^b
°Hue da polpa	102.73 ^a	100.59 ^{ab}	98.53 ^{bc}	99.23 ^{bc}	97.43 ^c	99.40 ^{bc}
Firmeza da polpa (N)	65.85 ^a	58.96 ^{ab}	54.82 ^{abc}	49.42 ^{bc}	49.80 ^{bc}	45.76 ^c
SS (%)	8.25 ^d	11.05 ^c	12.85 ^b	13.80 ^{ab}	14.13 ^{ab}	14.93 ^a
AT (g 100 ⁻¹)	0.98 ^a	0.87 ^b	0.81 ^{bc}	0.78 ^{bc}	0.74 ^c	0.60 ^d
SS/AT	8.43 ^c	12.78 ^d	15.97 ^c	17.76 ^{bc}	19.17 ^b	24.88 ^a
Primavera						
°Hue da casca	107.13 ^{ab}	112.98 ^a	110.45 ^{ab}	107.740 ^b	105.37 ^b	109.50 ^{ab}
°Hue da polpa	96.05 ^a	96.24 ^a	96.26 ^a	95.60 ^a	96.07 ^a	96.34 ^a
Firmeza da polpa (N)	58.70 ^a	58.39 ^a	55.00 ^{ab}	49.73 ^{ab}	49.39 ^{ab}	47.28 ^b
SS (%)	6.45 ^b	9.98 ^a	10.65 ^a	10.76 ^a	10.53 ^a	11.53 ^a
AT (g 100 ⁻¹)	1.29 ^a	0.98 ^a	1.03 ^a	1.00 ^a	1.07 ^a	0.72 ^b
SS/AT	5.02 ^a	10.13 ^b	10.47 ^b	10.71 ^b	10.52 ^b	16.17 ^a

*Médias seguidas da mesma letra em cada linha são estatisticamente iguais de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

VALIDAÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O₂ SOB CONDIÇÕES DE ATMOSFERA CONTROLADA DINÂMICA (ACD)

A atividade respiratória de mangas da cultivar Tommy Atkins, em AR foi significativamente mais intensa somente aos 60 dias de armazenamento ao frio, quando comparada com o tratamento ACD. Após transferir para as condições de tempo de prateleira (7 dias a 25 °C) obteve-se uma maior taxa respiratória das frutas em AR, quando comparados com as frutas armazenadas em ACD, durante todo o período de armazenamento. Os valores do ângulo hue° de casca e da polpa mantiveram-se mais elevados sob ACD do que sob AR durante o armazenamento a frio e as condições de conservação (Fig. 4C, 4D, 4E, 4F).

A taxa de amolecimento das frutas durante o armazenamento a frio foi maior sob AR do que sob ACD (Fig. 4G). Aos 45 e 60 dias de armazenamento a frio, as frutas armazenadas em AR apresentaram firmeza da polpa mais baixa do que as frutas armazenadas em ACD (Fig. 4G). As condições de armazenamento resultaram no amolecimento das frutas mantidas em AR e ACD (Fig. 4H). Após o período de prateleira, as frutas armazenadas em ACD apresentaram maior firmeza de polpa do que aquelas armazenadas em AR apenas aos 30 + 7 e 45 + 7 dias, mas não aos 15 + 7 e 60 + 7 dias (Fig. 4H).

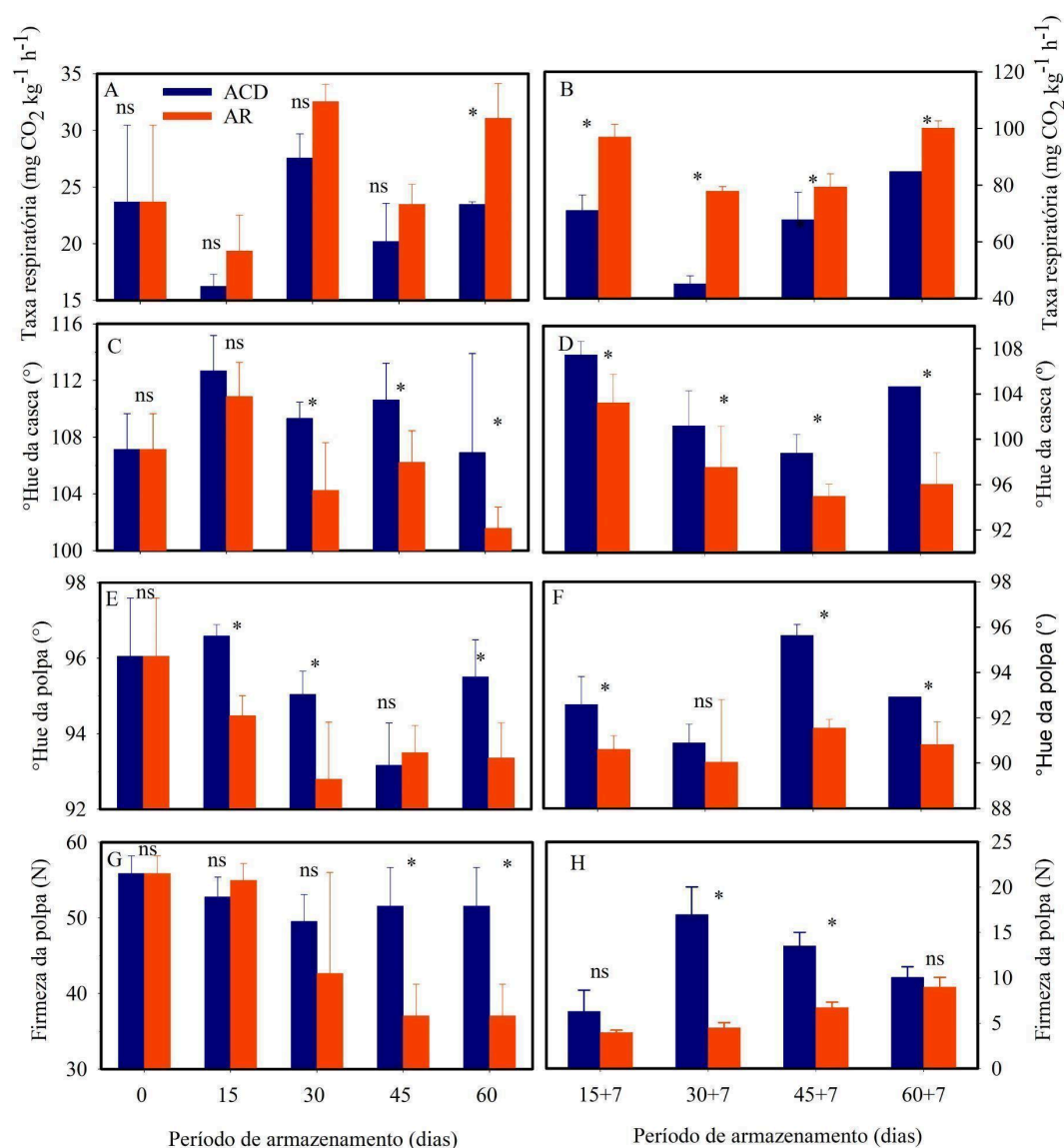


Figura 4. Taxa respiratória (A e B), °Hue da casca (C e D), °Hue da polpa (E e F), e firmeza de polpa (G e H) de mangas ‘Tommy Atkins’ produzidas na época de cultivo de inverno em 2022 e armazenadas sob atmosfera controlada dinâmica (ACD) e atmosfera refrigerada (AR) por 60 dias a 9 °C (A, C, E, G) mais 7 dias de vida de prateleira a 25 °C (B, D, F, H). Médias seguidas de ns (não significativo) são estatisticamente iguais, de acordo com o teste F. Médias seguidas por asterisco (*) são diferentes estatisticamente conforme o teste F.

O teor de sólidos solúveis registou um maior aumento, bem como valores mais elevados, nas frutas armazenadas em AR do que nas frutas armazenadas em ACD durante o armazenamento a frio (Fig. 5A). Após o período de armazenamento, não houve diferença estatística para o teor de sólidos solúveis entre frutas armazenados em AR e ACD aos 15 + 7, 30 + 7, 45 + 7 dias (Fig. 5B). Aos 60 + 7 dias de vida útil, as frutas armazenadas com AR apresentaram maior teor de sólidos solúveis do que as frutas armazenadas com ACD (Fig. 5B).

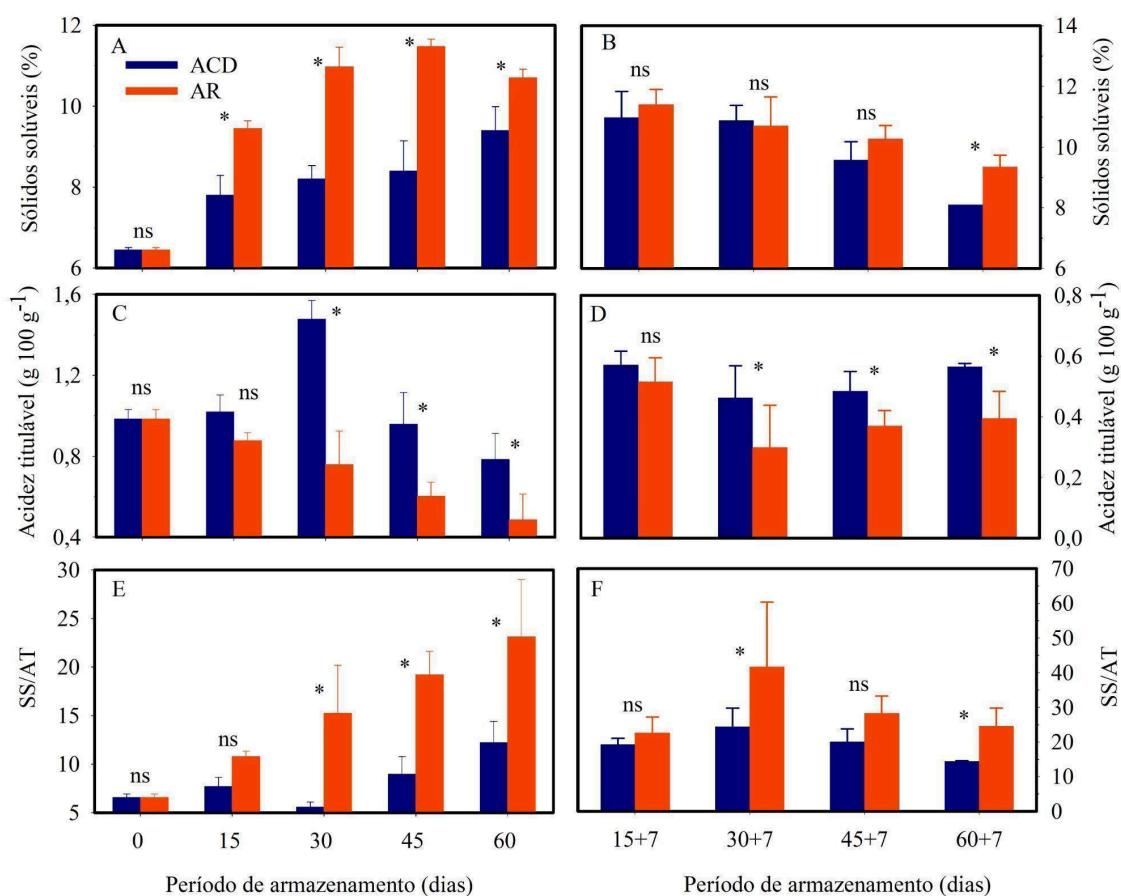


Figura 5. Sólidos solúveis (A e B), acidez titulável (C e D) e relação SS/AT (E e F) de mangas ‘Tommy Atkins’ produzidas na época de cultivo de inverno em 2022 e armazenadas sob atmosfera controlada dinâmica (ACD) e atmosfera refrigerada (AR) por 60 dias a 9 °C (A, C, E) mais 7 dias de vida de prateleira a 25 °C (B, D, F). Médias seguidas de ns (não significativo) são estatisticamente iguais, de acordo com o teste F. Médias seguidas por asterisco (*) são diferentes estatisticamente conforme o teste F.

A acidez titulável manteve-se mais elevada nas frutas armazenadas com ACD, em comparação com as frutas armazenadas com AR aos 30, 45 e 60 dias de armazenamento a

frio e após sete dias de vida útil (Fig. 5C, 5D). A relação SS/AT aumentou durante o armazenamento a frio, sendo mais acentuado nas frutas armazenadas em AR do que nas frutas armazenadas em ACD (Fig. 5E, 5F). Foram observados ratios SS/AT mais elevados nas frutas armazenadas em AR aos 30, 45 e 60 dias de armazenamento a frio, em comparação com as frutas armazenadas em ACD (Fig. 5E). Após o período de armazenamento, não foram encontradas diferenças estatísticas entre frutas armazenadas sob AR e ACD para a razão SS/AT aos 15 + 7 e 45 + 7 dias de armazenamento, mas foram observados teores de SS/AT mais elevados nas frutas armazenadas em AR aos 30 + 7 e 60 + 7 dias e com as frutas armazenadas em ACD (Fig. 5F).

As mangas mantidas sob ACD não apresentavam corte negro durante todo o período de armazenamento a frio e nem durante o período de prateleira, enquanto as mangas mantidas sob AR apresentaram cerca de 50% e 75% de incidência de corte negro após 60 dias de armazenamento a frio e 60 + 7 dias de vida útil, respectivamente (Fig. 6A, 6B). A incidência de podridão foi observada após 45 dias sob AR, e após 60 dias de armazenamento em ACD. Aos 60 dias de armazenamento a frio e 60 + 7 dias de vida útil, o ACD apresentou menor incidência de podridão do que o AR (Fig. 6C, 6D).

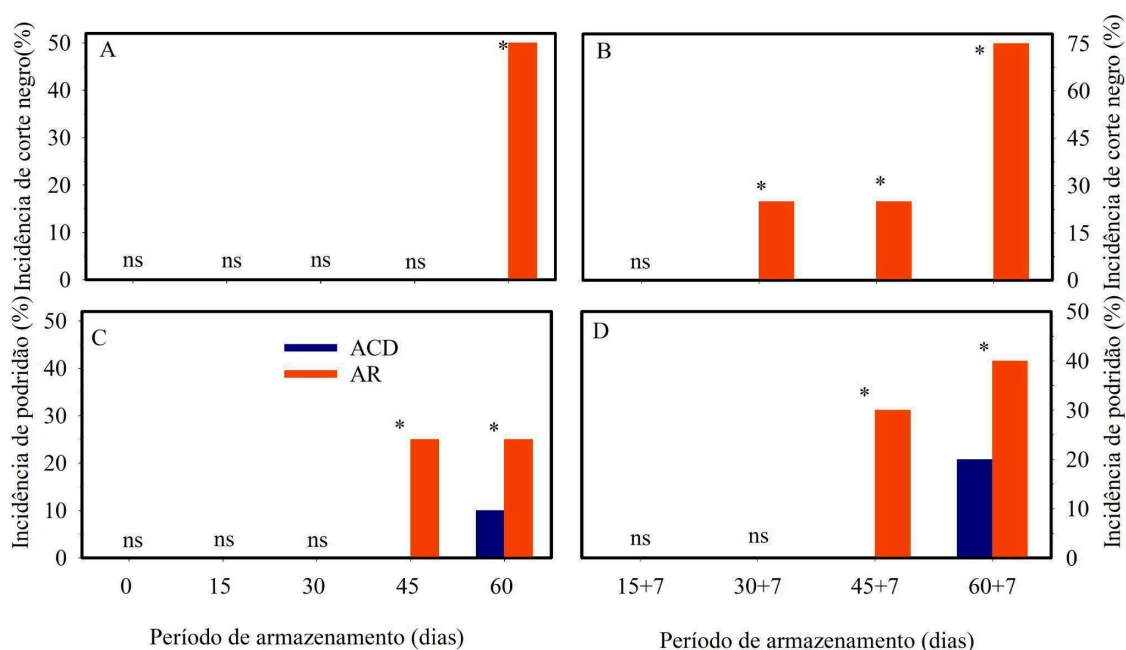


Figura 6. Incidência de corte negro (A e B) e incidência de podridão (C e D) de mangas ‘Tommy Atkins’ produzidas na época de cultivo de inverno em 2022 e armazenadas sob atmosfera controlada dinâmica (ACD) e atmosfera refrigerada (AR) por 60 dias a 9 °C (A e C) mais 7 dias de vida de prateleira a 25 °C (B e D). Médias seguidas de ns (não significativo) são estatisticamente iguais, de acordo com o teste F. Médias seguidas por asterisco (*) são diferentes estatisticamente conforme o teste F.

DISCUSSÃO

DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O₂ REQUERIDOS PARA MANTER A RESPIRAÇÃO AERÓBICA

A taxa respiratória é um importante indicador da atividade metabólica de frutas, a qual pode ser utilizada como ferramenta para otimizar condições de armazenamento. Neste estudo, a taxa respiratória de mangas 'Tommy Atkins', colhidas nas três estações de cultivo e armazenadas a 9 °C, mostraram uma redução no consumo de O₂ e aumento na produção de CO₂, aumentando também o quociente respiratório (QR). Ao longo do amadurecimento do fruto, as células e os tecidos tornam-se desorganizados, causando bloqueios no tecido que reduzem a permeabilidade ao O₂ (Amarante e Banks, 2000; Lima *et al.*, 2010). Sob estas condições, foi observado um aumento gradual na produção de CO₂ durante o armazenamento, o qual, segundo Evans *et al.*, (2017) caracteriza-se como um comportamento padrão da respiração de frutas climatéricas. Taxas de respiração semelhantes foram observados em mangas 'Keitt' e 'Tommy Atkins' armazenadas a 8 °C (Bender *et al.*, 2021).

O QR representa a razão entre o volume de CO₂ produzido e o volume de O₂ consumido por um tecido vivo (Saltveit, 2019). Dependendo dos substratos metabólicos, os valores do QR variam normalmente entre QR = 1 (açúcar), QR < 1 (lípidos) e QR > 1,0 (ácidos orgânicos) (Fonseca *et al.*, 2002). Consoante os nossos resultados, o QR era cerca de 1,0 no início e aumentou até 1,8 e 1,5 no final do armazenamento para mangas produzidas nas épocas de verão e inverno, respectivamente. Nas frutas produzidas na primavera, o QR foi de 1,08 na sexta semana de armazenamento. De acordo com Saltveit (2019), estes resultados sugerem uma alteração na fonte de carbono utilizada para a respiração das frutas durante o armazenamento.

No verão, a produção de etanol foi tardia para as frutas armazenadas por uma, duas e três semanas, e o pico começou aproximadamente 26-29 h após o fechamento das câmaras. Por outro lado, as frutas armazenadas por períodos mais longos, especialmente quatro, cinco e seis semanas, anteciparam para 16-23h após o fechamento das câmaras. As tecnologias de atmosfera controlada (AC) e de atmosfera modificada (AM) baseiam-se na redução da *p*O₂ e no aumento do *p*CO₂ na atmosfera de armazenamento para inibir o amadurecimento e manter a qualidade da fruta durante o armazenamento (Kader, 2003). No entanto, a diminuição dos níveis de O₂ no ambiente de armazenamento acabará por conduzir à respiração anaeróbica na fruta, resultando em acetaldeído e produção de etanol (Saltveit, 2019). Portanto, analisar a

produção de etanol de frutas em resposta à diminuição dos níveis de O_2 nas câmaras seladas foi uma abordagem eficiente para determinar o nível de O_2 que resulta na mudança da respiração aeróbica para a respiração anaeróbica.

A pO_2 e a pCO_2 na transição da respiração aeróbica para a anaeróbica nas frutas produzidas no verão e na primavera mostram que as mangas nas primeiras fases de armazenamento (até 3 semanas) eram mais tolerantes a baixas pO_2 ($\leq 3,5$ kPa). Por outro lado, a pO_2 na transição da respiração aeróbica para a respiração anaeróbica nas frutas produzidas no inverno foi cerca de $\leq 2,3$ kPa durante o armazenamento. Estes resultados indicam que a manga 'Tommy Atkins' pode ser armazenada a 9 °C por até seis semanas em atmosferas com pO_2 de 2,3 kPa, sem respiração anaeróbica. As diferentes exigências de pO_2 durante o armazenamento entre colheitas podem estar relacionadas com as condições ambientais em que as frutas foram produzidas no SVSF.

O armazenamento de AC usando pO_2 e pCO_2 fixos foi estudado em muitas cultivares de manga, incluindo 'Kent' (Trinidad *et al.*, 1997; Bender e Brecht, 2000a), 'Tommy Atkins' (Lizada & Ochagavia, 1997; Bender e Brecht, 2000a; Bender *et al.*, 2021), 'Manila' (Ortega-Zaleta e Yahia, 2000), 'Haden' (Bender *et al.*, 2000b), 'Palmer' (Teixeira e Durigan, 2011; Almeida *et al.*, 2018), e 'Shelly' (Ntsoane *et al.*, 2019).

Mais recentemente, estudos utilizando atmosfera controlada dinâmica (ACD) através da fluorescência da clorofila na manga 'Chok Anan' foram publicados (Ikwan *et al.*, 2021), mas esta tecnologia induz um baixo stress de O_2 no início do armazenamento. Do mesmo modo, foram efetuados estudos com MAPs para manter a qualidade pós-colheita das mangas (Fonseca *et al.*, 2002; Brecht *et al.*, 2017; Vilvert *et al.*, 2022).

Estes estudos utilizaram pO_2 que possivelmente não favoreceram a manutenção máxima da qualidade das frutas, mantendo alta pressão parcial de O_2 durante o armazenamento, o que pode levar à perda de qualidade devido à respiração excessiva ou à indução da produção de etanol. Neste estudo, as mangas 'Tommy Atkins' produzidas no verão e mantidas em câmara frigorífica durante 2 e 3 semanas mostraram que a transição da respiração aeróbica para a anaeróbica ocorre com pO_2 inferior a 0,5 kPa. No entanto, nas últimas semanas de armazenamento, as mesmas frutas produziram etanol a uma pO_2 muito mais elevada, de acordo com Porat & Fallik (2008) possivelmente é devido à respiração anaeróbica ou metabolismo acelerado em resposta ao amadurecimento e senescência.

De fato, estudos anteriores mostraram que o amadurecimento da manga leva a uma maior produção de etanol, acumulando níveis elevados na fase pós-climatérica (Bender *et al.*, 2000a, 2000b). Além disso, vários estudos mostraram também efeitos benéficos do etanol no

retardamento do amadurecimento/senescência em brócolis (Asoda *et al.*, 2009), melões (Jin *et al.*, 2013) e maçãs (Weber *et al.*, 2020). O etanol também está envolvido na síntese desejável de compostos aromáticos em maçãs (Wright *et al.*, 2015; Thewes *et al.*, 2021a), o que poderia melhorar a qualidade de consumo da manga.

Embora estudos tenham demonstrado que o CO₂ também pode afetar a respiração das frutas, os nossos resultados mostraram que os níveis de CO₂ acumulados até à passagem da respiração aeróbica para a anaeróbica não tiveram qualquer efeito na síntese de etanol nas frutas. O comportamento das frutas armazenadas com absorção de CO₂ foi igual ao das frutas armazenadas sem absorção de CO₂. Estas condições foram avaliadas para determinar possíveis condições comerciais para o transporte marítimo de mangas a longas distâncias, com a utilização de condições ideais de pO_2 e pCO_2 ideais, ou apenas de O₂ com absorção de CO₂.

As mangas 'Tommy Atkins' produzidas nas três épocas de cultivo apresentaram uma diminuição da cor verde da casca durante o armazenamento, representada por valores mais baixos de ângulo hue, que, segundo Evans *et al.*, (2017), é uma das mudanças mais importantes levando a atributos de qualidade desejáveis para o consumo. De acordo com Kader (2003) e Brecht *et al.* (2017), as mangas que serão consumidas em mercados próximos podem ser colhidas com coloração verde-claro, mas as frutas serão mais sensíveis a danos mecânicos e à incidência de podridões, apresentando menor longevidade pós-colheita.

A cor da polpa é um importante índice de qualidade utilizado para determinar o estágio de desenvolvimento da manga que muda em resposta à degradação da clorofila e à síntese de carotenoides e flavonoides (Singh e Zaharah, 2013; Nordey *et al.*, 2014). Conforme os nossos resultados, as mangas produzidas nas três épocas de cultivo chegaram ao final do armazenamento com cor de polpa variando de creme a amarelo menos intenso, indicando um desejável amadurecimento das frutas durante o armazenamento a frio a 9 °C. Essa baixa temperatura foi eficiente na redução das alterações de cor da casca e da polpa, considerando as pequenas diferenças entre os valores de cor na colheita e após seis semanas de armazenamento. De fato, Bender *et al.* (2021) também verificaram pequenas alterações no desenvolvimento da cor da casca e da polpa de 'Tommy Atkins' e mangas 'Keitt' armazenadas a 5 e 8 °C.

O amolecimento das frutas após a colheita ocorre devido ao aumento da atividade das enzimas que degradam a parede celular, bem como devido à perda de pressão de turgor celular (Singh e Zaharah, 2013; Lawson *et al.*, 2019). A principal implicação prática destas

alterações é que a perda de firmeza da polpa torna mais difícil a distribuição e comercialização das frutas.

A firmeza de polpa recomendada para a manga 'Tommy Atkins' na colheita é de 129,50 N, buscando manter a vida pós-colheita e reduzir as perdas (Brecht *et al.*, 2017).

Os mesmos autores sugerem que a firmeza mínima da polpa para mangas exportadas da América do Sul deve estar entre 66 e 90 N no packing house. Além disso, o amolecimento das frutas pode ser atenuado por procedimentos adequados de manuseio e técnicas de conservação, tais como o uso de baixas temperaturas associadas a atmosferas controladas ou modificadas (Brecht *et al.*, 2017).

O aumento do SS durante o armazenamento deve-se à conversão das reservas de hidratos de carbono, como o amido, em açúcares simples, proporcionando o sabor doce da fruta (Singh *et al.*, 2013; Khaliq *et al.*, 2015; Xing *et al.*, 2020). A diminuição da AT durante o armazenamento das frutas ocorre devido ao consumo de ácidos orgânicos no metabolismo respiratório, que se intensifica durante o amadurecimento (Maldonado *et al.*, 2019). Consequentemente, o aumento significativo da relação SS/AT observada no nosso estudo deveu-se aos efeitos combinados da redução da AT e do aumento do SS durante o armazenamento.

VALIDAÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O₂ SOB CONDIÇÕES DE ACD

No nosso estudo, a baixa pO_2 durante o armazenamento em ACD foi eficiente em retardar a respiração das frutas aos 60 dias de armazenamento a frio e após sete dias de vida útil a 25 °C. Em baixa pO_2 , a biossíntese de etileno é reduzida inibindo a atividade do ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico (ACC) sintase e ACC oxidase, ambas enzimas-chave na via de síntese do etileno (Kader, 2003). Portanto, a menor taxa de respiração em frutas armazenadas com ACD é possivelmente o resultado de uma menor produção de etileno, fitormônio conhecido por desencadear o aumento da respiração em frutas climatéricas, como mangas (Both *et al.*, 2017).

Além disso, a maior produção de etanol em frutas armazenadas com ACD também poderia inibir a expressão e atividade da ACC oxidase e ACC sintase, como relatado em outros estudos (Asoda *et al.*, 2009). Outrossim, Weber *et al.*, (2020) também demonstraram que a aplicação de 500 $\mu\text{L L}^{-1}$ de etanol durante o armazenamento de maçãs 'Braeburn' desencadeou uma redução na atividade da ACC oxidase, na produção de etileno, respiração e permeabilidade de membrana, além de manter as frutas mais verdes e reduzir a atividade da

β -galactosidade. No entanto, estes efeitos positivos do etanol na manutenção da qualidade das frutas relatados são dependentes da concentração utilizada (Pesis, 2005), sugerindo que o nível máximo de etanol observado em frutas armazenados com ACD ($16 \mu\text{L L}^{-1}$) foi benéfico para a manutenção da qualidade da manga durante o armazenamento.

Em nosso estudo, a baixa $p\text{O}_2$ foi eficiente em retardar as mudanças de cor da casca e da polpa da manga durante o armazenamento em ACD, em comparação com o armazenamento em AR. De fato, estudos relataram que a baixa $p\text{O}_2$ pode diminuir a expressão de genes relacionados com alterações de pigmentos em espécies de culturas (Ntsoane *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2021). Contudo, outros estudos também mostraram que as mangas ‘Tommy Atkins’ e ‘Palmer’ armazenadas em condições estáticas de AC com $p\text{O}_2$ a 2% e 5%, respectivamente, resultaram em respiração anaeróbica, desenvolvimento de sabores indesejáveis, descoloração das frutas, maturação irregular e maior suscetibilidade à podridão (Singh e Zaharah, 2015; Almeida *et al.*, 2018). Estes diferentes resultados podem ser explicados pelas diferentes condições de cultivo e características de qualidade das frutas que possivelmente resultaram em diferentes $p\text{O}_2$ mínimas necessárias para manter a respiração aeróbica das frutas, como observado em nosso estudo com mangas produzidas em diferentes épocas de cultivo.

A maior firmeza da polpa observada nas frutas armazenadas com ACD, em comparação com as frutas armazenadas em AR, deveu-se possivelmente ao efeito da $p\text{O}_2$ na inibição do amadurecimento e dos processos de degradação da parede celular, bem como no desencadeamento da produção de etanol. Foi demonstrado que o etanol mantém a firmeza da polpa em cerejas (Bai *et al.*, 2011) e melões (Liu *et al.*, 2012), possivelmente por inibição da síntese de etileno, que reduz a expressão/atividade de enzimas de degradação da parede celular (Goulao e Oliveira, 2008; Payasi *et al.*, 2009). Nesse caso, a baixa $p\text{O}_2$ manteve eficientemente a firmeza da manga, aumentando a resistência das frutas aos mercados de longa distância, o que, para Brecht *et al.* (2017), é considerada uma das limitações mais importantes.

O corte negro é um distúrbio fisiológico caracterizado por uma coloração castanha-escura e secamento da polpa interna do fruto, que ocorre após a colheita e mais frequentemente em frutas armazenadas a frio (Brecht, 2019; Mogollon *et al.*, 2020). Embora haja informações limitadas sobre os mecanismos que regulam o desenvolvimento de corte negro, os sintomas castanho-escuros sugerem que os processos oxidativos podem estar envolvidos na determinação da incidência e gravidade do distúrbio na fruta (Li & Chen, 2017; Brecht, 2019; Mogollon *et al.*, 2020; De Bang *et al.*, 2021). De fato, neste estudo

mostra-se que as condições de ACD com baixo pO_2 controlaram eficientemente a incidência do escurecimento de polpa em mangas 'Tommy Atkins' armazenadas a 9 °C durante 60 dias. Nesse caso, uma condição de pO_2 tão baixa poderia possivelmente inibir os processos oxidativos necessários para o desenvolvimento dos sintomas desse distúrbio na fruta.

A incidência de podridão durante o armazenamento é uma das causas mais importantes de perdas de frutas (Vilanova *et al.*, 2014). No presente trabalho, as frutas armazenadas sob ACD tiveram menor incidência de podridão do que as frutas armazenadas sob AR, que foi possivelmente devido ao efeito inibitório da baixa pO_2 no amadurecimento e no desenvolvimento de agentes patogênicos nas frutas. De fato, estudos demonstraram que pO_2 baixa reduz a incidência de podridão em espécies frutíferas, possivelmente por retardar o amadurecimento e desencadeando a síntese de acetaldeído e etanol que inibem desenvolvimento de agentes patogênicos na fruta (Pesis, 2005; Imahori *et al.*, 2013).

Embora o conteúdo de sólidos solúveis tenha aumentado gradualmente em ambas as condições de armazenamento, o aumento foi mais pronunciado nas frutas armazenadas em AR do que em ACD. Durante o amadurecimento da fruta, o amido é hidrolisado em açúcares, principalmente glicose, frutose e sacarose, o que resulta em maiores teores de sólidos solúveis e proporciona o desejável sabor doce. Por conseguinte, os nossos resultados sugerem que a decomposição do amido em açúcares foi retardada em frutas armazenadas em ACD, em comparação com as frutas armazenadas em AR. Este efeito ocorreu possivelmente devido à baixa pO_2 no armazenamento ACD, que retardou os processos metabólicos envolvidos na decomposição do amido e na acumulação de açúcares no fruto, e por conseguinte o seu amadurecimento (Singh e Zaharah, 2013).

A AT diminuiu durante o armazenamento, mas manteve-se mais elevada no ACD do que nas frutas armazenadas em AR, principalmente nas fases posteriores do armazenamento. Nesse caso, a menor pO_2 aplicada no ACD reduziu possivelmente a atividade do ciclo do ácido tricarboxílico, mantendo níveis mais elevados de ácidos orgânicos na fruta (Saquet, 2019). Consequentemente, o sabor do fruto, representado pelo balanço entre o teor de açúcares e ácidos orgânicos quantificados pela relação SS/AT, aumentou mais acentuadamente em frutas armazenadas sob AR, em comparação com o ACD. Isso ocorre devido à maior degradação de ácidos e hidrólise do amido (Singh e Zaharah, 2013; Saquet, 2019).

CONCLUSÃO

As mangas 'Tommy Atkins' produzidas no verão, no inverno e na primavera exigiram diferentes níveis mínimos de O_2 para inibir ao máximo a respiração aeróbica, variando de 0,25 kPa a 13,75 kPa, 0,80 kPa a 2,30 kPa e 1,42 kPa a 17,40 kPa, respectivamente, ao longo do armazenamento refrigerado a 9 °C. O armazenamento de mangas 'Tommy Atkins' sob ACD, usando os níveis mínimos de O_2 identificados neste estudo, retardou efetivamente o amadurecimento das frutas, controlou o escurecimento de polpa e reduziu a incidência de podridão durante 60 dias de armazenamento refrigerado a 9 °C e 60 + 7 dias de vida útil a 25 °C.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer a empresa Argofruta Comercial Exportadora Ltda. pelo fornecimento das frutas utilizadas nas pesquisas, assim como a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa (Processo: APQ-1046-5.01/22) e pela bolsa do Programa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico Regional fornecida a coorientadora deste trabalho (Processo: APQ-0015-5.01/23), bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa fornecida ao orientador deste trabalho (Processo: 305222/2023-6).

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA TEIXEIRA, G. H.; SANTOS, L. O.; CUNHA JÚNIOR, L. C.; DURIGAN, J. F. Effect of carbon dioxide (CO₂) and oxygen (O₂) levels on quality of ‘Palmer’ mangoes under controlled atmosphere storage. *Journal of food science and technology*, v. 55, n. 1, p. 145–156, 2018.
- AMARANTE, C.; BANKS, N.H., Postharvest physiology and quality of coated fruits and vegetables. *Hortic. Rev.* 26, 161–238. <https://doi.org/10.1002/9780470650806.ch4>, 2000.
- ARAÚJO, D. DE O.; MORAES, J. A. A.; CARVALHO, J. L. M. DE. fatores determinantes na mudança do padrão de produção e consumo da manga no mercado nacional. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v. 10, n. Ed.esp., p. 51, 2017.
- ASODA, T.; TERAÍ, H.; KATO, M.; SUZUKI, Y. Effects of postharvest ethanol vapor treatment on ethylene responsiveness in broccoli. *Postharvest biology and technology*, v. 52, n. 2, p. 216–220, 2009.
- AYELE, L.; BAYLEYEGN, A. Effect of low temperature storage on ripening and quality of Mango (*Mangifera indica* L.). *J. Agric. Sci*, v. 5, p. 570–576, 2017.
- BAI, J.; PLOTTO, A.; SPOTTS, R.; RATTANAPANONE, N. Ethanol vapor and saprophytic yeast treatments reduce decay and maintain quality of intact and fresh-cut sweet cherries. *Postharvest biology and technology*, v. 62, n. 2, p. 204–212, 2011.
- BANG, T. C.; HUSTED, S.; LAURSEN, K. H.; PERSSON, D. P.; SCHJOERRING, J. K. The molecular-physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. *The new phytologist*, p. 2446–2469, 2021.
- BENDER, R. J.; BRECHT, J. K.; SARGENT, S. A.; HUBER, D. J. Mango tolerance to reduced oxygen levels in controlled atmosphere storage. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. American Society for Horticultural Science, v. 125, n. 6, p. 707–713, 2000a.

BENDER, R. J.; BRECHT, J. Respiração e produção de etanol e de etileno em mangas armazenadas sob diferentes concentrações de dióxido de carbono e oxigênio. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, v. 35, n. 5, p. 865–871, 2000b.

BENDER, R. J.; BRECHT, J. K.; SARGENT, S. A. Low storage temperature for tree ripe mangoes under controlled atmospheres with elevated CO₂ concentrations. *Journal of the science of food and agriculture*, v. 101, n. 3, p. 1161–1166, 2021.

BOTH, V.; THEWES, F. R.; BRACKMANN, A.; DE OLIVEIRA ANESE, R.; DE FREITAS FERREIRA, D.; WAGNER, R. Effects of dynamic controlled atmosphere by respiratory quotient on some quality parameters and volatile profile of “Royal Gala” apple after long-term storage. *Food chemistry*, v. 215, p. 483–492, 2017

BRECHT, J. K.; SARGENT, S. A.; KADER, A. A.; MITCHAM, E. J.; MAUL, F.; BRECHT, P. E.; MENOCAL. *Mango Postharvest Best Management Practices Manual*. University of Florida, Gainesville. 2017.

BRECHT, J. K.; SARGENT, S. A.; KADER, A. A.; MITCHAM, E. J.; MAUL, F.; BRECHT, P. E.; MENOCAL, O. *Mango postharvest best management practices manual*. EDIS, v. 2020, n. 5, 2020.

EVANS, E. A.; BALLEEN, F. H.; SIDDIQ, M. *Handbook of Mango Fruit: Production, Postharvest Science, Processing Technology and Nutrition*. Hoboken: Wiley Blackwell, 2017.

FONSECA, S. C.; OLIVEIRA, F. A. R.; BRECHT, J. K. Modelling respiration rate of fresh fruits and vegetables for modified atmosphere packages: a review. *Journal of food engineering*, v. 52, n. 2, p. 99–119, 2002.

FREITAS, S. T.; PAREEK, S.; DE FREITAS, S. T.; PAREEK, S. *Postharvest Physiological Disorders in Fruit and Vegetables*. CRC Press, Boca Raton Florida, pp. 443–466. 2019

GOULAO, L.; OLIVEIRA, C. Cell wall modifications during fruit ripening: when a fruit is not the fruit. *Trends in food science & technology*, v. 19, n. 1, p. 4–25, 2008.

IKWAN, W. W. M. R.; THAM, S. L.; RAZALI, M.; AZLIN, R. N.; FIKKRI, A. M. Dynamic controlled atmosphere storage technique by means of chlorophyll fluorescence extends storage life of Chokanan mango. *J. Trop. Agr. Fd. Sc.*, v. 49, 2021.

IMAHORI, Y.; YAMAMOTO, K.; TANAKA, H.; BAI, J. Residual effects of low oxygen storage of mature green fruit on ripening processes and ester biosynthesis during ripening in bananas. *Postharvest biology and technology*, v. 77, p. 19–27, 2013.

JANICK, J. (Org.). *Horticultural Reviews: Volume 26*. Nashville, TN, USA: John Wiley & Sons, 2000.

JIN, Y. Z.; LIU, W. W.; QI, H. Y.; BAI, X. H. Ethanol vapor treatment maintains postharvest storage quality and inhibits internal ethylene biosynthesis during storage of oriental sweet melons. *Postharvest biology and technology*, v. 86, p. 372–380, 2013.

KADER, A. A. A summary of ca requirements and recommendations for fruits other than apples and pears. *Acta horticulturae*, n. 600, p. 737–740, 2003.

KHALIQ, G.; MOHAMED, M. T. M.; ALI, A.; DING, P.; GHAZALI, H. M. Effect of gum arabic coating combined with calcium chloride on physico-chemical and qualitative properties of mango (*Mangifera indica* L.) fruit during low temperature storage. *Scientia horticulturae*, v. 190, p. 187–194, 2015.

KIM, Y.; BRECHT, J. K.; TALCOTT, S. T. Antioxidant phytochemical and fruit quality changes in mango (*Mangifera indica* L.) following hot water immersion and controlled atmosphere storage. *Food chemistry*, v. 105, n. 4, p. 1327–1334, 2007.

LAWSON, T.; LYCETT, G. W.; ALI, A.; CHIN, C. F. Characterization of Southeast Asia mangoes (*Mangifera indica* L) according to their physicochemical attributes. *Scientia horticulturae*, v. 243, p. 189–196, 2019.

LI, J.; CHEN, J.Z., 2017. Citrus fruit-cracking: causes and occurrence. *Hortic. Plant J.* 3, 255–260. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2017.08.002>.

LIMA, Á. M.; CERQUEIRA, M. A.; SOUZA, B. W.; SANTOS, E. C. M.; TEIXEIRA, J. A.; MOREIRA, R. A.; VICENTE, A. A. New edible coatings composed of galactomannans and collagen blends to improve the postharvest quality of fruits – Influence on fruits gas transfer rate. *Journal of food engineering*, v. 97, n. 1, p. 101–109, 2010.

LIU, B.; JIAO, W.; WANG, B.; SHEN, J.; ZHAO, H.; JIANG, W. Near freezing point storage compared with conventional low temperature storage on apricot fruit flavor quality (volatile, sugar, organic acid) promotion during storage and related shelf life. *Sci. Hortic.*, 2019, 249, 100–109.

LIZADA, L. A.; OCHAGAVIA, A. Controlled atmosphere storage of mango fruits (*Mangifera indica* L.) cvs Tommy Atkins and Kent. *Acta Horticulturae*, Leuven, v. 455, p. 732-737, 1997.

MALDONADO-CELIS, M. E.; YAHIA, E. M.; BEDOYA, R.; LANDÁZURI, P.; LOANGO, N.; AGUILLÓN, J.; GUERRERO OSPINA, J. C. Chemical composition of mango (*Mangifera indica* L.) fruit: nutritional and phytochemical compounds. *Front. Plant Sci*, v. 10, 2019.

MOGOLLÓN, R.; CONTRERAS, C.; DA SILVA NETA, M. L.; MARQUES, E. J. N.; ZOFFOLI, J. P.; DE FREITAS, S. T. Non-destructive prediction and detection of internal physiological disorders in “Keitt” mango using a hand-held Vis-NIR spectrometer. *Postharvest biology and technology*, v. 167, n. 111251, p. 111251, 2020.

National Mango Board (NMB), 2022. Mango Postharvest Best Management Practices. <https://www.mango.org/professionals/industry/improving-mangoquality/production-postharvest-best-practices/>. Acesso em: mar. 2023.

NORDEY, T.; JOAS, J.; DAVRIEUX, F.; GÉNARD, M.; LÉCHAUDEL, M. Non-destructive prediction of color and pigment contents in mango peel. *Scientia horticulturae*, v. 171, p. 37–44, 2014.

NTSOANE, M. L.; LUCA, A.; ZUDE-SASSE, M.; SIVAKUMAR, D.; MAHAJAN, P. V. Impact of low oxygen storage on quality attributes including pigments and volatile compounds in 'Shelly' mango. *Scientia horticulturae*, v. 250, p. 174–183, 2019.

ORTEGA-ZALETA, D.; YAHIA, E. M. Tolerance and quality of mango fruit exposed to controlled atmospheres at high temperatures. *Postharvest biology and technology*, v. 20, n. 2, p. 195–201, 2000.

PAYASI, A.; MISHRA, N.N.; CHAVES, A.L.S.; SINGH, R. Biochemistry of fruit softening: an overview. *Physiol. Mol. Biol. Plants* 15, 103–113, 2009

PESIS, E. The role of the anaerobic metabolites, acetaldehyde and ethanol, in fruit ripening, enhancement of fruit quality and fruit deterioration. *Postharvest biology and technology*, v. 37, n. 1, p. 1–19, 2005.

PORAT, R.; FALLIK, E. Production of off-flavours in fruit and vegetables under fermentative conditions. *Em: Fruit and Vegetable Flavour*. [s.l.] Elsevier, 2008. p. 150–164.

SAQUET, A. A., Storage of pears. *Sci. Hortic.* 246, 1009–1016. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.11.091>, 2019.

SALTVEIT, M. E., Respiratory metabolism. In: Yahia, E., Carrillo-Lopez, A. (Eds.), *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*. Woodhead Publishing, Sawston, pp. 73–91, 2019.

SINGH, Z.; ZAHARAH, S. S. Controlled atmosphere storage of mango fruit - an overview. *Acta horticulturae*, n. 992, p. 481–492, 2013.

SINGH, Z.; ZAHARAH, S. S. Controlled atmosphere storage of mango fruit: Challenges and thrusts and its implications in international mango trade. *Acta horticulturae*, n. 1066, p. 179–191, 2015.

TEIXEIRA, G. H. DE A.; DURIGAN, J. F. Storage of 'Palmer' mangoes in low-oxygen atmospheres. *Fruits*, v. 66, n. 4, p. 279–289, 2011.

THEWES, F. R.; WOOD, R. M.; BOTH, V.; KESHRI, N.; GEYER, M.; PANSERA-ESPÍNDOLA, B.; NEUWALD, D. A. Dynamic controlled atmosphere: A review of methods for monitoring fruit responses to low oxygen. *Comunicata Scientiae*, v. 12, p. e3782, 2021a

THEWES, F. R.; BOTH, V.; SCHULTZ, E. E.; BERGHETTI, M. R. P., LUDWIG, V., BRACKMANN, A. Static× dynamic controlled atmosphere: impacts of aerobic and anaerobic metabolism on physiological disorders and overall quality of 'Royal Gala' apples. *LWT* 141, 110922, 2021b.

TRINIDAD, M.; BÓSQUEZ, E.; ESCALONA, H.; DIAZ DE LEÓN, F.; PÉREZ FLORES, L.; KERBEL, C.; PONCE DE LEÓN, L.; MUÑOZ, C.; PÉREZ, L. Controlled atmospheres (5% CO₂-5% O₂ and 10% CO₂-5% O₂) do not significantly increase the storage life of refrigerated Kent mangoes. *Acta horticulturae*, n. 455, p. 643–653, 1997.

VELTMAN, R. H.; VERSCHOOR, J. A.; RUIJSCH VAN DUGTEREN, J. H. Dynamic control system (DCS) for apples (*Malus domestica* Borkh. cv. 'Elstar'): optimal quality through storage based on products response. *Postharvest Biol. Technol.*, v. 27, n. 1, p. 79–86, 2003.

VILANOVA, L.; VIÑAS, I.; TORRES, R.; USALL, J.; BURON-MOLES, G.; TEIXIDÓ, N. Increasing maturity reduces wound response and lignification processes against *Penicillium expansum* (pathogen) and *Penicillium digitatum* (non-host pathogen) infection in apples. *Postharvest biology and technology*, v. 88, p. 54–60, 2014.

VILVERT, J. C.; DE FREITAS, S. T.; FERREIRA, M. A. R.; LEITE, R. H. de L.; DOS SANTOS, F. K. G.; COSTA, C. dos S. R.; AROUCHA, E. M. M. Chitosan and graphene oxide-based biodegradable bags: An eco-friendly and effective packaging alternative to maintain postharvest quality of 'Palmer' mango. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie [Food science and technology]*, v. 154, n. 112741, p. 112741, 2022.

WEBER, A.; NEUWALD, D. A.; KITTEMANN, D.; THEWES, F. R.; BOTH, V.; BRACKMANN, A. Influence of respiratory quotient dynamic controlled atmosphere (DCA – RQ) and ethanol application on softening of Braeburn apples. Food chemistry, v. 303, n. 125346, p. 125346, 2020.

WRIGHT, A. H.; DELONG, J. M.; ARUL, J.; PRANGE, R. K. The trend toward lower oxygen levels during apple (*Malus × domestica*Borkh) storage. The journal of horticultural science & biotechnology, v. 90, n. 1, p. 1–13, 2015.

XING, Y., YANG, H.; GUO, X.; BI, X., LIU, X.; XU, Q.; ZHENG, Y. I. Effect of chitosan/Nano-TiO₂ composite coatings on the postharvest quality and physicochemical characteristics of mango fruits. Scientia horticulturae, v. 263, n. 109135, p. 109135, 2020.

ZHANG, Y.; MA, Y.; GUO, Y.; YANG, M.; FU, R.; CHEN, Y.; SUN, Y. Comprehensive insight into the chlorophyll degradation mechanism of postharvest broccoli heads under elevated O₂ controlled atmosphere. Scientia horticulturae, v. 288, n. 110395, p. 110395, 2021.

CAPÍTULO II

CONSERVAÇÃO DA QUALIDADE DE MANGAS 'PALMER' EM CONDIÇÕES DE ATMOSFERA CONTROLADA DINÂMICA

RESUMO

Níveis ideais de O_2 para o transporte marítimo de mangas em condições de atmosfera controlada podem desempenhar um papel importante na manutenção da qualidade e na extensão da vida útil dos frutos, especialmente para mercados distantes. O objetivo deste estudo foi determinar os limites mínimos de O_2 para o transporte de mangas 'Palmer' em condições de ACD. As mangas foram produzidas durante diferentes épocas de cultivo na região do Vale do São Francisco, Brasil. Para a identificação dos níveis mínimos de O_2 , as mangas foram armazenadas durante 42 dias a 9 °C e 90-95% UR. A mudança do metabolismo aeróbico para anaeróbico foi determinada semanalmente com base nos níveis de produção de O_2 , CO_2 e etanol dentro de recipientes hermeticamente fechados contendo amostras de frutas. A validação dos níveis mínimos de O_2 identificados ao longo do estudo foi realizada com o armazenamento de mangas 'Palmer' em ACD. As mangas foram avaliadas aos 0, 15, 30, 45 e 60 dias de armazenamento a 9 °C, assim como após sete dias a 25 °C para simular a vida de prateleira. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado em um esquema fatorial 2 x 5 (2 atmosferas x 5 períodos de armazenamento). Consoante os resultados obtidos, a conservação eficiente da qualidade de mangas 'Palmer' pode ser alcançada com níveis mínimos de O_2 de 0,3 kPa e 1,75 kPa, referente a frutas produzidas na safra de verão e inverno, respectivamente. Estes níveis de O_2 se mostraram seguros para inibir ao máximo a respiração aeróbica e retardar as mudanças físico-químicas relacionadas ao processo de amadurecimento de mangas 'Palmer' durante o período de transporte refrigerado para mercados distantes.

Palavras-chave: *Mangifera indica* L.; limite mínimo de O_2 ; respiração.

'PALMER' MANGO QUALITY CONSERVATION UNDER DYNAMIC CONTROLLED ATMOSPHERE CONDITIONS

ABSTRACT

Ideal O₂ levels for 'Palmer' mango shipping under controlled atmosphere conditions can play an important role in maintaining fruit quality and extending shelf life, especially for distant markets. The aim of this study was to determine the minimum O₂ levels required for shipping 'Palmer' mangoes under DCA. The fruit were harvested during different growing seasons in the São Francisco Valley, Brazil. In order to identify the minimum O₂ levels, the mangoes were stored for 42 days at 9°C and 90-95% relative humidity. The transition from aerobic to anaerobic metabolism was determined weekly based on O₂, CO₂, and ethanol production levels within hermetically sealed chambers containing fruit samples. The validation of the identified minimum O₂ levels throughout the study was carried out by storing 'Palmer' mangoes in DCA. The fruits were evaluated at 0, 15, 30, 45, and 60 days of storage at 9° C, as well as after seven days at 25°C to simulate shelf life. The experiment followed a completely randomized design, organized in a 2 x 5 factorial (2 atmospheres x 5 storage periods). According to the results, efficient preservation of 'Palmer' mango quality can be achieved with minimum O₂ levels of 0.3 kPa and 1.75 kPa, for fruits harvested in the summer and winter growing seasons, respectively. These O₂ levels were found to be safe to effectively inhibit aerobic respiration and delay the physicochemical changes related to the ripening process of 'Palmer' mangoes, during shipping under refrigerated conditions to distant markets.

Keywords: *Mangifera indica* L.; minimum O₂ limit; respiration.

INTRODUÇÃO

A manga está entre as principais frutas tropicais cultivadas no mundo, principalmente para o consumo *in natura*. Essa fruta possui diversos compostos bioativos, como proteínas, provitamina A, carotenoides, compostos fenólicos, fibras alimentares, carboidratos, minerais e vitaminas A e C, que proporcionam benefícios medicinais, nutricionais e industriais (Evans *et al.*, 2017; Zafar & Sidhu, 2017).

Diante de outras cultivares produzidas no Vale do São Francisco, a ‘Palmer’ ganha destaque pelo sabor agradável, baixo teor de fibras e pela alta aceitação no mercado. Esta cultivar apresenta produção semi-tardia, produzindo frutas com polpa amarela e firme, casca fina, relação polpa/fruta de 72% (Genú & Pinto, 2002).

Por ser uma fruta climatérica, a vida útil da manga ‘Palmer’ é curta, variando de 6 a 8 dias de vida pós-colheita a 25 °C (Nunes *et al.*, 2007). A alta taxa respiratória e perecibilidade limitam sua comercialização para mercados distantes (Singh & Zaharah, 2015; Evans *et al.*, 2017). A vida útil pós-colheita da manga é relativamente curta, considerando que as exportações da fruta ainda são realizadas predominantemente por via marítima, o que leva cerca de 15 dias até serem entregues aos países importadores (Sabato *et al.*, 2009; Bender *et al.*, 2021), assim, faz-se necessário a utilização de tecnologias que auxiliem na manutenção da qualidade dos frutos durante o transporte entre as regiões produtoras e o mercado consumidor final.

Em condições de atmosfera controlada (AC), as pressões parciais de O₂ (pO_2) e CO₂ (pCO_2) são mantidas constantes durante todo o período de armazenamento, não levando em consideração a estação de cultivo, local de produção, estágio de maturação e o tempo de armazenamento (Tran *et al.*, 2015). Além disto, a AC não leva em consideração o metabolismo das frutas ao longo do processo de amadurecimento, não sendo realizado o monitoramento constante dos limites mínimos de O₂ para estabelecer as condições mais eficientes de atmosfera para inibir o metabolismo aeróbico das frutas. Por precaução, o nível de O₂ é mantido bem acima do limite mínimo tolerado pela fruta, não sendo possível a redução máxima do metabolismo e, conseqüentemente, alcançar o potencial máximo na preservação da qualidade das frutas (Thewes *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2023).

Em relação a manga ‘Palmer’, tem sido demonstrado que o armazenamento sob AC contendo de 1 a 10% de O₂ é capaz de reduzir a taxa respiratória, atrasar a maturação e manter a qualidade das frutas ao longo de 28 dias de armazenamento a 12,8 °C (Teixeira & Durigan, 2011). Por outro lado, o acréscimo de CO₂ (1 – 20%) associado ao baixo O₂ (5%)

não resultou em aumento da vida útil quando as mangas 'Palmer' foram armazenadas a 12,8 °C por 30 dias (Almeida *et al.*, 2018).

Diferente do armazenamento em AC, em que as concentrações de gases são estáticas, no sistema de atmosfera controlada dinâmica (ACD) a alteração dos níveis de O₂ é feita conforme a resposta fisiológica das frutas durante o seu amadurecimento (Zanella, 2003; Weber *et al.*, 2015). Neste sistema é levado em consideração o limite mínimo de oxigênio tolerado pela fruta. Quando o nível crítico de O₂ é atingido, a concentração de O₂ é ajustada automática ou manualmente para restaurar as condições ideais de armazenamento (Deuchande, 2016).

O etanol, produto da fermentação, pode ser utilizado como indicador para determinar os limites mínimos de O₂ e ser uma ferramenta de monitoramento de estresse durante o armazenamento ou transporte de frutas em ACD. Dessa forma, à medida que a concentração de etanol aumenta, os níveis de O₂ são ajustados para haver redução no metabolismo anaeróbico e a normalização dos teores de etanol, visto que, em altas concentrações, pode comprometer a integridade da fruta (Bender *et al.* 2000; Veltman *et al.*, 2003 Deuchande, 2016; Mditshwa *et al.*, 2018).

Com o intuito de minimizar as perdas pós-colheita de mangas devido a processos bioquímicos, deterioração fisiológica, pontos de colheita inadequados ou manuseio inadequado, o objetivo deste estudo foi determinar os níveis ótimos de oxigênio (O₂) capazes de inibir ao máximo a respiração aeróbica e prolongar a vida útil das mangas 'Palmer' produzidas em diferentes safras no Vale do São Francisco.

MATERIAL E MÉTODOS

MATERIAL VEGETAL

Mangas 'Palmer' (*Mangifera indica* L.) foram produzidas em pomar comercial localizado no Vale do São Francisco, Petrolina, PE, Brasil (latitude 9°03'04,6"S, longitude 40°17'46,5"O). Frutos de tamanho médio foram colhidos em duas épocas produtivas diferentes, verão e inverno (2021), em maturidade fisiológica, caracterizada por ombros cheios e coloração da epiderme verde-claro predominante (National Mango Board, 2010). Os pomares comerciais utilizados no estudo foram submetidos às mesmas práticas de manejo em todas as safras, conforme recomendações técnicas.

DEFINIÇÃO DE NÍVEIS MÍNIMOS DE O₂ PARA MANTER A RESPIRAÇÃO AERÓBICA

Na colheita e a cada sete dias de armazenamento, cada amostra de 21 frutas foi colocada numa câmara de polietileno de 20 L, hermeticamente fechada a 9 °C, com septos de borracha e um mini-ventilador para homogeneização do ar. No interior de cada câmara, foram colocados dois sachês de 20 g de permanganato de potássio (99%) para absorver o etileno produzido pelas frutas. Após o fechamento das câmaras, o O₂ interno foi reduzido por meio da injeção de gás N₂ para o monitoramento dos níveis de O₂ consumido pelo processo respiratório das frutas.

A pressão parcial de O₂ (pO_2), a pressão parcial de CO₂ (pCO_2) e a concentração de etanol foram monitoradas em intervalos de uma hora até a identificação de etanol na atmosfera de armazenamento, indicativo de mudança de respiração aeróbica para anaeróbica. Todas as análises foram realizadas semanalmente durante o armazenamento com diferentes amostras de frutas. Os valores mínimos de O₂ e máximos de CO₂ no momento exato momento da transição da respiração aeróbia para a anaeróbia foram estimados com uma regressão linear.

Determinação dos níveis de O₂, CO₂, etanol e quociente respiratório

A avaliação dos níveis de pO_2 e pCO_2 foi conduzida utilizando um analisador de gases modelo PA 7.0 (WITT-Gasetechnik GmbH & Co KG, Alemanha). Para a quantificação da concentração de etanol, empregou-se um analisador de gases portátil Dräger X-am 5000, fabricado pela Dräger, Alemanha. Os resultados dessa análise foram expressos em ($\mu\text{L L}^{-1}$). No que diz respeito à taxa respiratória, esta foi avaliada por meio do monitoramento da produção de CO₂ durante as duas primeiras horas em que as frutas permaneceram confinadas nas câmaras de 20 L. A taxa de produção de CO₂ foi expressa em $\text{mg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$. O quociente respiratório (QR) foi calculado como a razão entre a produção de CO₂ e o consumo de O₂ dentro das câmaras.

Atmosfera com absorção de CO₂

A determinação da pO_2 mínima, no ponto inicial da síntese de etanol pelas frutas, foi conduzida em condições com a absorção de CO₂. Em cada câmara foram inseridos dois sachês contendo 150 g de hidróxido de cálcio. Durante esse período, o pO_2 e a produção de etanol foram monitoradas, seguindo a metodologia previamente descrita. A transição para a

atmosfera com absorção de CO_2 foi implementada após a conclusão da análise das câmaras sem esse processo, proporcionando uma comparação entre as condições atmosféricas.

VALIDAÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O_2 SOB CONDIÇÕES DE ACD

Mangas ‘Palmer’ de tamanho médio foram produzidas durante o inverno de 2022 e foram colhidas na maturidade fisiológica utilizada comercialmente. Após a colheita, as frutas foram lavadas e homogeneizadas com base no tamanho, cor, uniformidade, peso e ausência de doenças visíveis e injúrias. As mesmas foram então armazenadas a $9\text{ }^\circ\text{C}$ ($\pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$) e 90-95% UR por 60 dias sob atmosfera refrigerada (AR) ou atmosfera controlada dinâmica (ACD). Cada condição de armazenamento foi composta por quatro repetições com 24 frutas por repetição.

Para o armazenamento em AR, as frutas foram colocadas em bandejas plásticas, enquanto as armazenadas sob ACD foram colocadas em câmaras de polietileno hermeticamente fechadas de 20 L. Cada câmara continha 150 g de permanganato de potássio (99%) para a absorção de etileno e 100 g de hidróxido de cálcio para a absorção de CO_2 .

A ACD foi implementada e mantida por meio de um sistema contínuo de umidificação a uma taxa de fluxo de 500 mL min^{-1} . O O_2 foi fornecido a partir de ar comprimido (21%), enquanto o nitrogênio (N_2) foi proveniente de um cilindro de gás de alta pureza (99,99%) (White Martins Gases Industriais Ltda., Brasil). A combinação desses gases foi cuidadosamente ajustada para atingir os níveis ideais de O_2 durante o armazenamento do ACD. Durante o período de armazenamento, que foi submetido a uma vigilância rigorosa, os gases presentes nas câmaras foram monitorados meticulosamente duas vezes ao dia. Isso foi realizado por meio dos analisadores de gases mencionados anteriormente, garantindo uma precisão na manutenção dos níveis desejados de O_2 .

No início do armazenamento em ACD, foi estabelecido um nível seguro de 3,5 kPa. Este valor foi determinado como a média (3,4 kPa), acrescida de 10% (0,1 kPa), com base nos valores mínimos de O_2 observados nas colheitas de frutas no ano anterior (2021). Essa abordagem foi adotada para assegurar a respiração aeróbica em todas as amostras de frutas, levando em consideração a variabilidade de 10% entre as amostras observadas no estudo anterior mencionado.

Ao longo do período de armazenamento, o nível de O_2 foi mantido no mínimo observado anteriormente e considerado seguro, visando promover uma produção de etanol moderada e benéfica. Este controle foi executado com a intenção de manter o teor de etanol

abaixo do valor recomendado de $500 \mu\text{L L}^{-1}$, conforme indicado para outras frutas (Weber et al., 2020; Thewes et al., 2021b).

As análises das frutas foram conduzidas aos 0, 15, 30, 45 e 60 dias de armazenamento, seguidos por avaliações adicionais aos sete dias após a retirada das frutas da câmara, quando estas foram mantidas em condições de vida de prateleira a 25°C ($\pm 0,5^\circ\text{C}$) e 90-95% de umidade relativa. Esses procedimentos foram conduzidos de acordo com o protocolo detalhado a seguir.

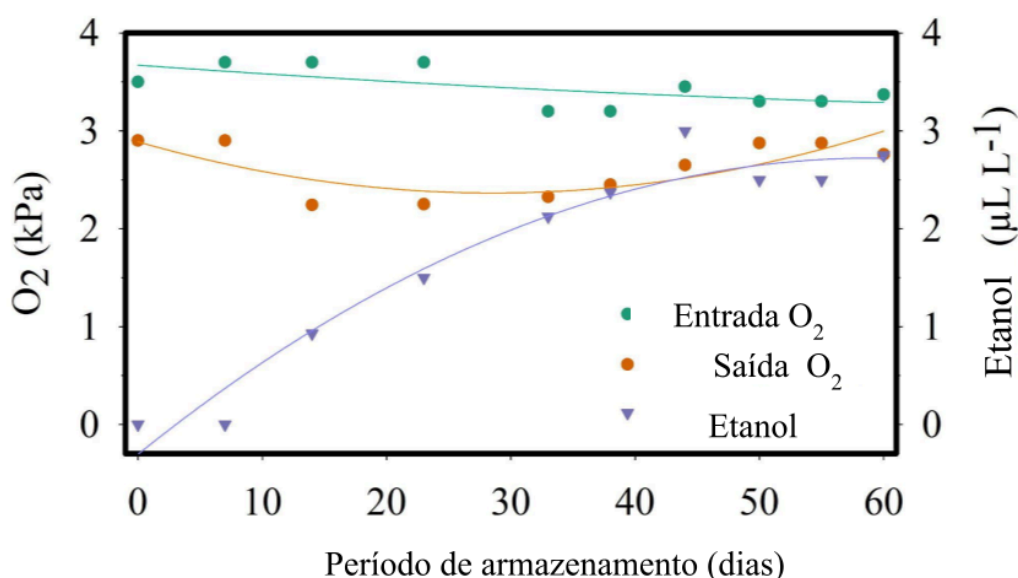


Figura 1. Entrada e saída de níveis de O_2 e concentração de etanol em câmaras de atmosfera controlada dinâmica utilizadas para armazenar mangas 'Palmer' por 60 dias a 9°C ($\pm 0,5^\circ\text{C}$).

ANÁLISE DA QUALIDADE DOS FRUTOS

Taxa respiratória

A atividade respiratória das frutas durante o armazenamento foi determinada utilizando-se câmaras de 20 L hermeticamente fechadas por duas horas. Foram coletadas amostras da composição atmosférica das câmaras através da retirada de uma alíquota de 10 mL de gás, utilizando uma seringa, por um septo de silicone existente no centro da tampa das câmaras, em seguida foi injetada no analisador de gases. Os cálculos da atividade respiratória das frutas, que corresponde a liberação de CO_2 e o consumo de O_2 , foram baseados na diferença entre a leitura inicial e final de cada câmara, peso da amostra e o tempo que os

frutos permaneceram hermeticamente fechados dentro das câmaras. A taxa de produção de CO_2 foi expressa em $\text{mg kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

Coloração da casca e da polpa

A determinação foi realizada através da avaliação objetiva, com colorímetro digital Minolta CR 400 (Konica Minolta, Ramsey, EUA), na escala tridimensional de cor CIE LCH. As frutas foram medidas de forma não destrutiva na região equatorial da fruta e na polpa da fruta cortada, com duas medições por fruta. Os resultados foram expressos em °Hue.

Firmeza de polpa (FP)

A firmeza da polpa foi determinada na região equatorial das frutas, em lados opostos. Para a medição, a casca da manga foi removida, e a firmeza expressa em Newtons (N) utilizando o texturômetro eletrônico Extralab TAXT Plus (Stable Micro Systems, Surrey, Reino Unido), com uma ponteira de 6 mm de diâmetro.

Determinação de sólidos solúveis totais (SST)

As leituras foram realizadas em refratômetro digital com compensação automática de temperatura modelo Pal-1 (ATAGO, Brasil), conforme AOAC (2012), utilizando-se para isso 1 mL de suco do fruto. A escala de leitura do equipamento usado varia de 0 a 65 ° Brix.

Determinação de acidez titulável (AT)

A acidez titulável foi determinada com a utilização de um titulador automático modelo 848 Titrino Plus (Metrohm, Brasil), a partir da diluição de 1 grama de polpa da amostra em 50 mL de água destilada, titulando-se com solução de NaOH 0,1 N, até a neutralização (pH 8,1), conforme o método do Instituto Adolfo Lutz- IAL (2005).

Relação SST/AT

A relação entre o teor de sólidos solúveis e acidez titulável foi calculada em cada amostra dividindo os valores de SST por seu valor respectivo de AT.

ANÁLISE ESTATÍSTICA

A primeira fase do experimento, definição dos mínimos de O_2 para manter a respiração aeróbica de frutas, seguiu um arranjo experimental inteiramente casualizado. Todos os dados obtidos de cada estação de cultivo foram analisados separadamente. Dados das análises físico-químicas foram submetidos à ANOVA, e as médias de cada semana de armazenamento foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Na etapa seguinte, a

validação dos níveis mínimos de O_2 sob condições de ACD para a manutenção da qualidade de frutas, o delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em arranjo de parcelas subdivididas, duas condições atmosféricas na parcela e os cinco tempos de armazenamento na subparcela. As atmosferas foram comparadas em cada tempo de armazenamento pelo teste F. Os dados foram representados por médias e desvios-padrão. A transformação do arco seno dos dados percentuais foi realizada antes da aplicação da ANOVA. Todas as análises estatísticas foram efetuadas utilizando o pacote ExpDes.pt R.

RESULTADOS

NÍVEIS MÍNIMOS DE O₂ PARA MANTER A RESPIRAÇÃO AERÓBICA DE MANGAS 'PALMER'

Durante as sete semanas de armazenamento, as mangas 'Palmer', provenientes de ambas as colheitas e armazenadas a 9 °C, exibiram um padrão semelhante de comportamento climatérico em relação à atividade respiratória, com uma redução no consumo de O₂, aumento na produção de CO₂ e, conseqüentemente, um aumento no quociente respiratório (QR) (Figura 1 do anexo). No fechamento das câmaras, as concentrações internas de gases foram estabelecidas em 10,55-14,59 kPa e 10,58-14,10 kPa de O₂, e 0,25-0,70 kPa e 0,25-0,43 kPa de CO₂, para as frutas colhidas no verão e inverno, respectivamente. (Figura 2 do anexo). Após 24 horas do fechamento das câmaras, o nível interno de O₂ diminuiu para 0,20-1,10 kPa e 1,75-4,13 kPa, enquanto o CO₂ aumentou para 8,45-11,45 kPa e 5,80-6,88 kPa para as frutas do verão e inverno, respectivamente (Figura 2 do anexo).

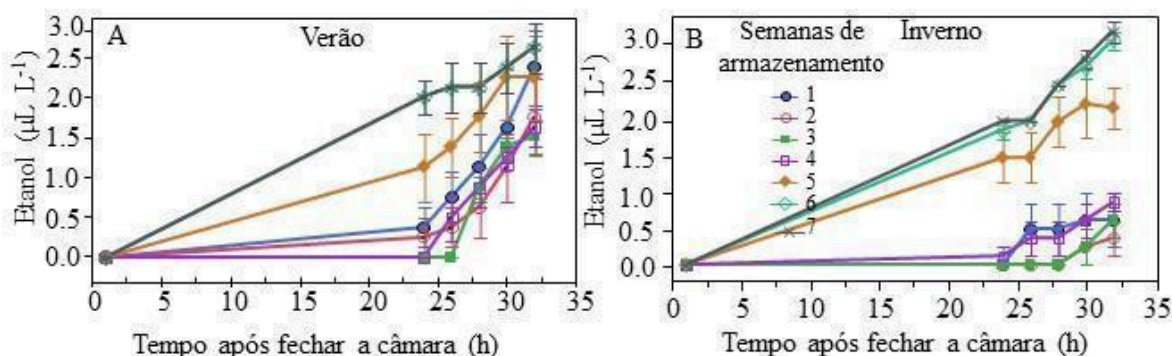


Figura 2. Concentração de etanol dentro das câmaras hermeticamente seladas com mangas 'Palmer' produzidas nas estações do verão (A) inverno (B) e armazenadas por seis semanas a 9 °C. Os valores representam a média ± erro padrão ($n = 4$).

Durante este período, também foi observada a produção de etanol pelas frutas em ambas as safras (Fig. 2A, 2B), com exceção dos frutos armazenados por 3 e 4 semanas, onde a produção inicial de etanol ocorreu após 26 e 28 horas, respectivamente, do fechamento das câmaras para as frutas do verão (Fig. 2A). Já para as frutas colhidas no inverno, a produção de etanol foi observada durante o armazenamento por 4, 5, 6 e 7 semanas, após 24 horas do fechamento das câmaras (Fig. 2B).

Os níveis mínimos de O₂ requeridos para a manutenção da respiração aeróbica para frutas produzidos no verão foi de 0,30, 0,49, 0,40 kPa, nas três primeiras semanas, respectivamente. Já para a safra de inverno, esses níveis de O₂ consistiram em 1,75, 1,60,

1,44 kPa (Fig. 3). A partir da 3ª semana, os níveis mínimos de O_2 necessários para manter a respiração aeróbica das frutas aumentou de 0,40 kPa para 4,70 kPa, diferente do comportamento observado de mangas da safra de inverno, onde houve uma mudança de 1,44 kPa para 10,21 kPa em apenas uma semana.

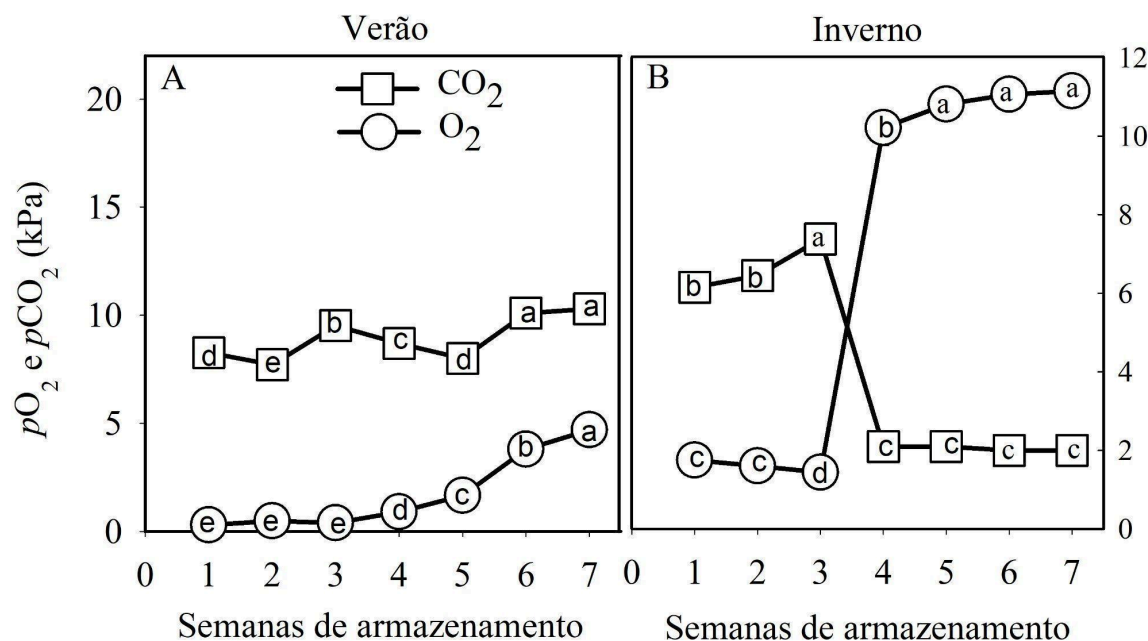


Figura 3. Pressões parciais de O_2 e CO_2 na transição da respiração aeróbica para anaeróbica de mangas ‘Palmer’ produzidas no verão (A) e inverno (B).

Consoante as análises físico-químicas, ao longo de todo o armazenamento, houve a mudança da coloração tanto da casca quanto da polpa, do verde e creme para amarelo. No que diz respeito à firmeza da polpa de frutas de verão, não houve influência do tempo de armazenamento, diferente das mangas produzidas no inverno. Em relação às concentrações de sólidos solúveis, o conteúdo de açúcares se intensificou ao longo das semanas, enquanto os teores da acidez titulável foram regredindo, no entanto, em mangas de inverno essa redução não foi significativa. O incremento do teor de sólidos solúveis e a diminuição da acidez com o avanço da maturação, resultou no acréscimo da relação SS/AT em ambas as épocas produtivas (Tabela 1).

Tabela 1. Qualidade físico-química das mangas 'Palmer' produzidas nas estações de crescimento de verão e inverno em 2021 e armazenadas a 9 °C por sete semanas.

Variável	Semanas de armazenamento						
	1	2	3	4	5	6	7
Verão							
°Hue casca	101.60 ^b	101.58 ^b	110.14 ^a _b	114.89 ^a	113.97 ^a	112.36 ^a _b	107.78 ^a _b
°Hue polpa	104.47 ^a	103.45 ^a	102.08 ^a	102.34 ^a	102.28 ^a	100.90 ^a	101.04 ^a
Firmeza de polpa (N)	56.96 ^a	55.07 ^a	49.14 ^a	40.98 ^a	47.46 ^a	41.91 ^a	37.37 ^a
SS (%)	8.98 ^e	10.68 ^d	11.68 ^{cd}	12.35 ^{bc}	13.08 ^{abc}	13.28 ^{ab}	13.78 ^a
AT (g 100 ⁻¹)	0.74 ^a	0.75 ^a	0.71 ^a	0.60 ^{ab}	0.65 ^a	0.50 ^{bc}	0.43 ^c
SS/AT	12.24 ^b	14.36 ^b	16.58 ^b	20.68 ^b	20.25 ^b	27.63 ^a	32.07 ^a
Inverno							
°Hue casca	118.98 ^a	108.62 ^b _c	118.25 ^a	115.60 ^a _b	105.60 ^c	107.51 ^c	105.07 ^c
°Hue polpa	105.16 ^a	101.81 ^b	101.97 ^b	100.21 ^b	100.01 ^b	100.08 ^b	99.74 ^b
Firmeza de polpa (N)	66.19 ^a	62.05 ^{ab}	61.32 ^{ab}	60.93 ^{ab}	56.37 ^{abc}	53.30 ^{bc}	48.52 ^c
SS (%)	5.88 ^c	6.75 ^{bc}	8.50 ^b	10.78 ^a	11.60 ^a	12.28 ^a	12.53 ^a
AT (g 100 ⁻¹)	1.26 ^a	1.26 ^a	1.13 ^a	0.84 ^a	1.21 ^a	0.85 ^a	0.76 ^a
SS/AT	4.85 ^c	5.67 ^c	8.06 ^{bc}	13.30 ^{ab}	10.93 ^{abc}	14.90 ^a	16.74 ^a

*Médias seguidas pela mesma letra em cada linha são estatisticamente iguais de acordo com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

VALIDAÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O₂ SOB CONDIÇÕES DE ATMOSFERA CONTROLADA DINÂMICA (ACD)

O armazenamento sob ACD com baixos níveis de O₂ reduziu significativamente a atividade respiratória de mangas 'Palmer' somente aos 15 dias de armazenamento ao 9 °C. Em condições de prateleira (7 dias a 25 °C), a taxa respiratória foi mais intensa em atmosfera refrigerada (AR), aos 30 + 7 e 60 + 7 dias (Fig. 4A, 4B). O uso de ACD também contribuiu significativamente para a redução da perda de massa das frutas, a partir dos 30 dias a 9 °C e dos 30 + 7 dias a 25 °C. Ao final do armazenamento, as mangas em AR apresentaram perda de massa de 8,20%, já em ACD, essa redução foi de apenas 3,79%. Após a transferência para

temperatura ambiente, a perda de massa totalizou em 7,78% e 11,98%, para mangas em condições de ACD e AR, respectivamente (Fig. 4C, 4D).

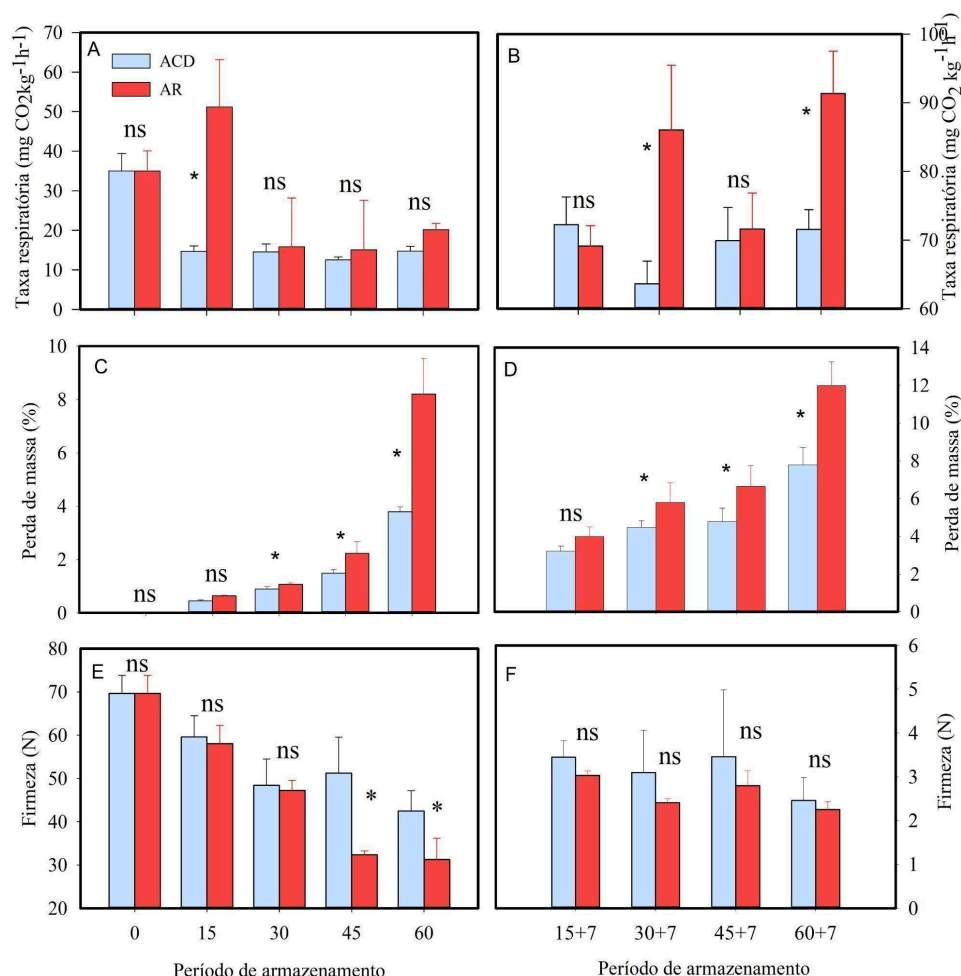


Figura 4. Taxa respiratória (A e B), perda de massa (C e D) e firmeza de polpa (E e F) de mangas ‘Palmer’ produzidas na época de cultivo de inverno em 2022 e armazenadas sob atmosfera controlada dinâmica (ACD) e atmosfera refrigerada (AR) por 60 dias a 9 °C (A, C, E) mais 7 dias de vida de prateleira a 25 °C (B, D, F). Médias seguidas de ns (não significativo) são estatisticamente iguais, de acordo com o teste F. Médias seguidas por asterisco (*) são diferentes estatisticamente de acordo com o teste F.

Segundo os resultados, observou-se o amolecimento das frutas durante o armazenamento. As frutas mantidas em condições de ACD mostraram diferenças em relação às frutas mantidas em AR aos 45 e 60 dias de armazenamento, apresentando uma firmeza de polpa inicial de 69,65 N e final (60 dias) de 42,40 N (ACD) e 31,26 N (AR), respectivamente. Após o período de prateleira à 25 °C, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos (Fig. 4E, 4F).

Quanto à coloração da casca e da polpa, determinada pelo ângulo hue, as mangas sob armazenamento em ACD apresentaram valores superiores aos das frutas mantidas em AR,

durante o armazenamento a 9 °C (Fig. 5A, 5C). Entretanto, durante o período de prateleira de 7 dias a 25 °C, não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos (Fig. 5B, 5D).

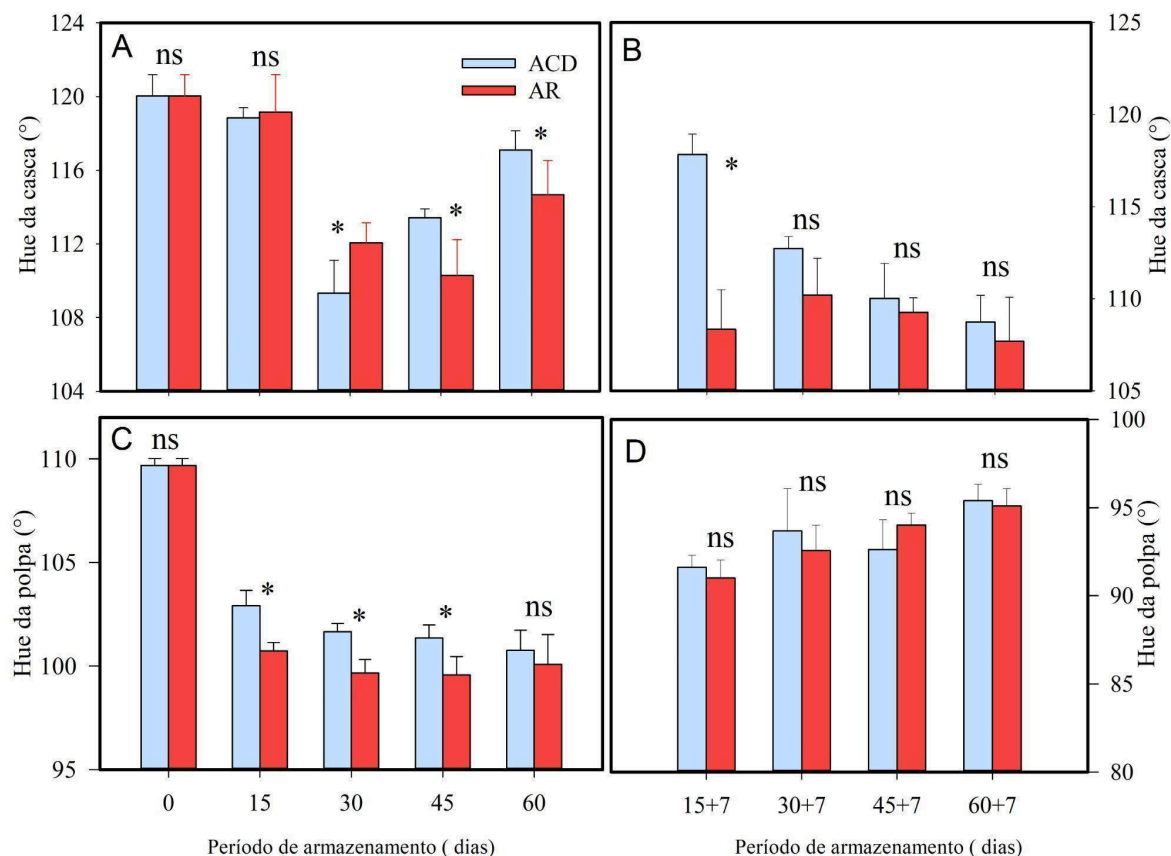


Figura 5. Ângulo Hue da casca (A e B) e da polpa (C e D) de mangas ‘Palmer’ produzidas na época de cultivo de inverno em 2022 e armazenadas sob atmosfera controlada dinâmica (ACD) e atmosfera refrigerada (AR) por 60 dias a 9 °C (A e C) mais 7 dias de vida de prateleira a 25 °C (B e D). Médias seguidas de ns (não significativo) são estatisticamente iguais, de acordo com o teste F. Médias seguidas por asterisco (*) são diferentes estatisticamente de acordo com o teste F.

Ao longo do armazenamento refrigerado, os teores de sólidos solúveis aumentaram gradualmente, com valores superiores em frutas armazenadas em AR, comparadas com frutas mantidas em ACD, evidenciando diferenças estatísticas até 45 dias de armazenamento (Fig. 6A). No entanto, aos 30 + 7 e 60 + 7 dias, as frutas armazenadas em ACD apresentaram teores de sólidos solúveis mais elevados do que aquelas mantidas em AR (Fig. 6B). Quanto à acidez titulável, observou-se que as frutas em condições de ACD exibiram valores mais elevados em relação ao armazenamento em AR, alcançando significância estatística somente aos 60 dias de armazenamento (Fig. 6C). Após o período de prateleira a 25 °C, as diferenças significativas entre os tratamentos foram observadas aos 30 + 7 dias e 60 + 7 dias (Fig. 6D).

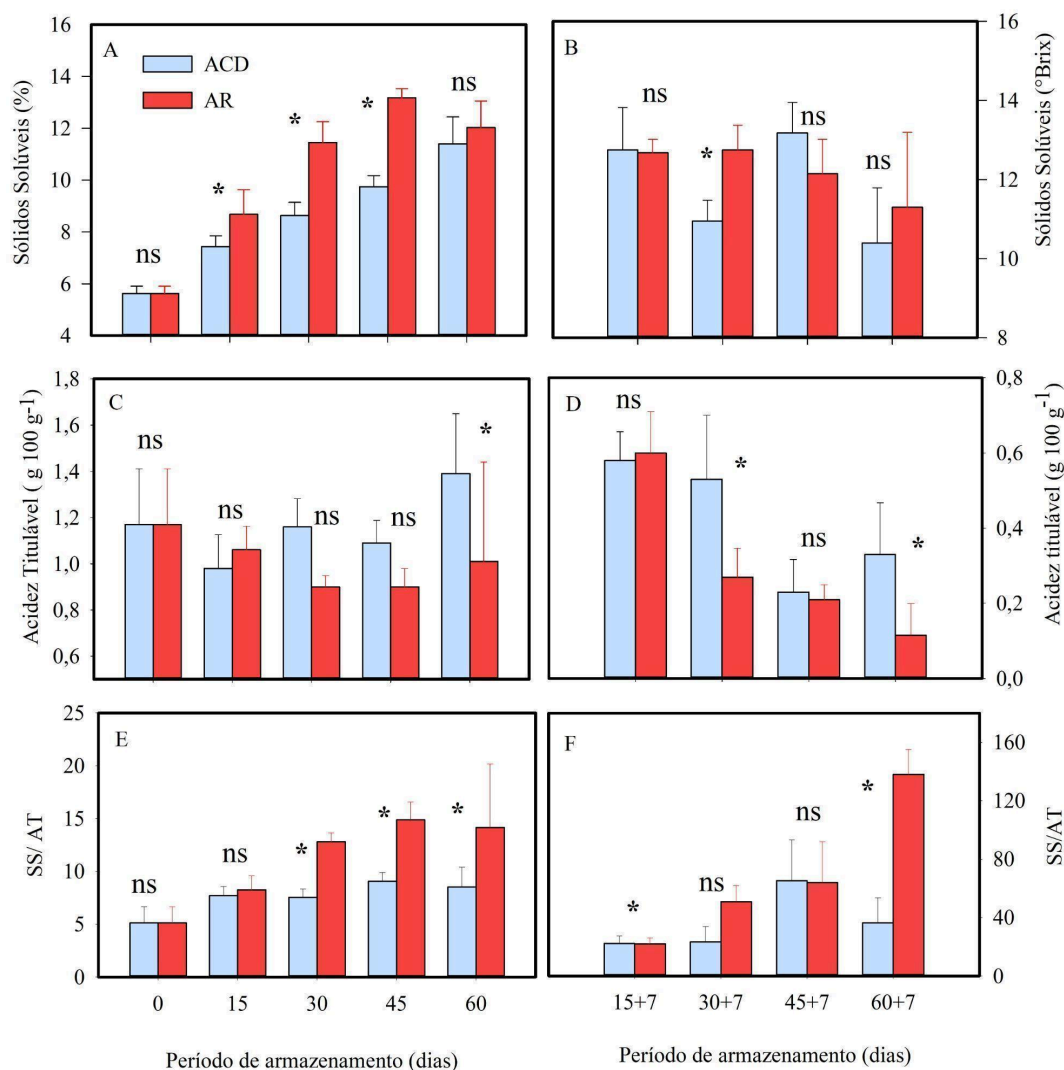


Figura 6. Sólidos solúveis (A e B), acidez titulável (C e D) e relação SS/AT (E e F) de mangas ‘Palmer’ produzidas na época de cultivo de inverno em 2022 e armazenadas sob atmosfera controlada dinâmica (ACD) e atmosfera refrigerada (AR) por 60 dias a 9 °C (A, C, E) mais 7 dias de vida de prateleira a 25 °C (B, D, F). Médias seguidas de ns (não significativo) são estatisticamente iguais, de acordo com o teste F. Médias seguidas por asterisco (*) são diferentes estatisticamente de acordo com o teste F.

Durante o período de armazenamento refrigerado, a relação SST/AT nas frutas em AR foi consistentemente mais elevada aos 30, 45 e 60 dias, em comparação com as frutas submetidas ao armazenamento em ACD (Fig. 6E). Após o término do período de armazenamento, observaram-se diferenças significativas apenas aos 30 + 7 e 60 + 7 dias (Fig. 6 F).

DISCUSSÃO

DEFINIÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O₂ PARA MANTER O METABOLISMO AERÓBICO DE MANGAS ‘PALMER’

O processo respiratório envolve uma série de reações de oxi-redução, sendo considerado o principal fator que contribui para as perdas pós-colheita de produtos perecíveis. Neste estudo, em ambas as estações produtivas, mangas ‘Palmer’ armazenadas a 9°C apresentaram o comportamento de redução do consumo de O₂ e aumento da produção de CO₂, consequentemente aumentando também o quociente respiratório (QR). O QR é baseado na relação entre a produção de CO₂ e o consumo de O₂. Em condições aeróbicas, o QR= 1 representa o uso de açúcares como substrato para a respiração, porém essa relação pode variar devido à alteração na fonte de carbono (Patel., 2023). No estudo em questão, o QR de mangas produzidas no verão e inverno partiu de cerca de 1,0 para 1,8 na sétima semana de armazenamento. Estes resultados associados ao fato dos menores teores de acidez encontrados na sétima semana sugerem a utilização dos ácidos orgânicos como substrato no processo respiratório, como retratado por Brackmann *et al.* (2011). O conteúdo de ácidos orgânicos diminui e o de açúcares solúveis aumenta, resultando num predomínio do sabor doce na fruta madura. O consumo desses ácidos orgânicos no processo respiratório é o principal responsável pela diminuição da acidez e o aumento do pH da fruta (ROCHA, 2001).

A maior produção de etanol, após 24h do fechamento das câmaras, se sucedeu a partir da quarta semana de armazenamento, em frutas de ambas as estações produtivas. O uso da tecnologia de ACD permite ajustar a concentração de O₂ em função do metabolismo de frutas e assim, reduzir as perdas de qualidade e prolongar o armazenamento (Weber *et al.*, 2016; Thewes *et al.*, 2020). Contudo, níveis muito baixos de O₂ podem levar a respiração anaeróbica e consequente produção de acetaldeído e etanol. Assim, se torna válida a utilização dos teores de etanol como ferramenta de determinação e monitoramento dos níveis mínimos de O₂ no sistema de ACD.

As pressões parciais de O₂ e CO₂, na transição da respiração aeróbica para anaeróbica, demandadas por frutas produzidas no verão e inverno foram baixas ($\leq 1,44$ kPa), nas três primeiras semanas de armazenamento, o que indica que mangas ‘Palmer’ podem ser armazenadas por 21 dias a 9 °C sem entrar no processo fermentativo. Este resultado corrobora com os encontrados por Teixeira & Durigan (2011) que relataram que as mangas ‘Palmer’ podem ser armazenadas a 12,8 °C em atmosferas com 1-10 kPa de O₂ por até 28 dias. Em mangas produzidas no inverno, a partir da quarta semana, houve a produção de

etanol em níveis acima de 10 kPa de O_2 , o que pode ser devido ao metabolismo acelerado em resposta ao amadurecimento e senescência.

O etanol é um dos importantes compostos voláteis produzidos pela fruta durante todo o processo de maturação e amadurecimento (El Hadi *et al.*, 2013), contudo, é retratado que determinados níveis de etanol, podem trazer benefícios para a conservação de frutas (Pesis, 2005). Liu *et al.* (2012) verificaram que a aplicação pós-colheita de etanol pode reduzir a concentração interna de etileno e retardar a senescência de melões, além de melhorar os níveis de compostos aromáticos voláteis.

Embora estudos tenham indicado o potencial efeito do CO_2 na inibição da respiração das frutas, nossos resultados destacam que os níveis acumulados de CO_2 até a transição da respiração aeróbica para a anaeróbica não influenciaram a síntese de etanol nas frutas. O comportamento das frutas armazenadas com absorção de CO_2 foi comparável ao das frutas armazenadas sem tal absorção. Essas condições foram analisadas visando identificar possíveis práticas comerciais para o transporte de mangas em longas distâncias por via marítima, considerando tanto condições ideais de pO_2 e pCO_2 quanto apenas de O_2 com absorção de CO_2 .

Durante o período de armazenamento, as mangas 'Palmer', cultivadas no verão e inverno, apresentaram uma leve diminuição na tonalidade verde da casca, o que se refletiu em ângulos hue mais baixos. Em muitas frutas, durante o amadurecimento, a mudança de cor ocorre devido à degradação da clorofila e ao aumento na concentração de pigmentos como carotenóides e polifenóis (Maringgal *et al.*, 2020). A cor da casca da manga é o atributo externo fundamental que mostra a maturidade ou o amadurecimento da manga (Penchaiya *et al.*, 2020), fator este importante para otimizar a estratégia de manejo pós-colheita e o processo de comercialização da fruta (Barrett *et al.*, 2010). A evolução da cor de polpa, em mangas de ambas as épocas, também não foi tão intensa, partindo da coloração creme para o amarelo, o que pode ser justificado pela utilização de baixas temperaturas durante o armazenamento.

A redução na firmeza de polpa da fruta ocorre como resultado de processos bioquímicos mediados por enzimas hidrolíticas, como amilase, celulase, pectinametilesterase e poligalacturonase, que degradam o amido e a parede celular, convertendo o amido em açúcar, acarretando à perda de turgor celular e firmeza das paredes que levam ao amaciamento da polpa (Vilas Boas *et al.*, 2004; Singh *et al.*, 2013).

Durante o processo de amadurecimento das frutas, é comum observar um aumento nos teores de sólidos solúveis, resultado da hidrólise do amido em açúcares solúveis (Lobo e

Sidhu, 2017; Singh *et al.*, 2013). Em mangas 'Palmer' completamente maduras, esse aumento pode atingir até 18 °Brix (Santos Neto *et al.*, 2017). No entanto, é importante ressaltar que o teor de sólidos solúveis pode variar dependendo da cultivar, condições climáticas e estágio fisiológico das frutas (Fabi *et al.*, 2010; Garcia *et al.*, 2012), como visto neste estudo.

A redução da acidez titulável ao longo do armazenamento está associada ao processo de respiração que utiliza ácidos orgânicos como substrato durante o processo de amadurecimento (Hossain *et al.*, 2014). Mesmo com essa redução, os valores encontrados se enquadram aos definidos pela Instrução Normativa N° 37 de 18 de outubro de 2018, de no mínimo 0,3 mg/100g de ácido cítrico em polpas de manga (Brasil, 2018). Como consequência ao aumento do conteúdo de açúcares e da redução da acidez, observou-se um aumento significativo da relação SS/AT. Conforme mencionado por Venceslau (2013), a relação SS/AT tem sido amplamente recomendada como um índice para avaliar a palatabilidade das frutas, fornecendo uma indicação do equilíbrio entre os açúcares e a acidez. Isso ocorre porque o sabor e o aroma das frutas são influenciados por interações complexas entre açúcares, ácidos orgânicos e outros componentes voláteis, como fenóis.

VALIDAÇÃO DOS NÍVEIS MÍNIMOS DE O₂ SOB CONDIÇÕES DE ATMOSFERA CONTROLADA DINÂMICA (ACD)

Frutas climatéricas, como a manga, caracterizam-se por um aumento da taxa de respiração durante o processo de amadurecimento, contudo, de acordo com Saltveit (2019), atmosferas com baixo teor de O₂ podem reduzir a respiração, a produção e a ação do etileno, retardando assim o processo de amadurecimento de frutas. Teixeira e Durigan (2011) também observaram uma redução na taxa respiratória de mangas 'Palmer' quando expostas a atmosferas com baixos níveis de oxigênio. Além disso, segundo Weber (2016), baixas concentrações de etanol podem trazer benefícios durante o armazenamento. A aplicação de vapor de etanol, na concentração de 0,15% em ameixas 'Laetitia' armazenadas por 35 dias sob refrigeração (0,5±0,1 °C/UR 96±1%) proporcionou menor taxa respiratória e de produção de etileno nas frutas, tanto na saída da câmara como após quatro dias em condição ambiente (20±5 °C e UR de 63±2%) (Martin *et al.*, 2018). Em nosso estudo, o nível máximo de etanol observado na fruta armazenada em ACD (3 µL L⁻¹) foi benéfico para a manutenção da qualidade da manga durante o armazenamento.

A perda de massa fresca está diretamente ligada às taxas respiratória e transpiratória das frutas. O aumento observado na perda de substrato pode ser atribuído à alta taxa

respiratória sob condições de armazenamento, resultando na perda de reservas no tecido (Saltveit, 2014). As mangas submetidas a AR apresentaram uma maior disponibilidade de O_2 . Essa maior oferta de O_2 pode ter contribuído para uma maior atividade metabólica das mangas, tornando mais rápido o processo de respiração e, conseqüentemente, aumentando a taxa de perda de massa durante o armazenamento. Visto que, a perda de massa fresca resulta da combinação da perda de água por transpiração e da perda de matéria seca devido à atividade respiratória de frutas (Finger; França, 2011), essa perda está intimamente ligada à deterioração, principalmente em frutas maduras, resultando em murchamento e enrugamento, perda da qualidade textural, assim como amaciamento e redução da suculência, além da degradação da qualidade nutricional (Vale, 2006; Azzolini *et al.*, 2004; Kader, 2000).

A firmeza da polpa é uma das principais características que define a qualidade de frutas, sendo um parâmetro de extrema importância para o armazenamento e conservação pós-colheita de mangas. A ACD reduziu o amolecimento das frutas, corroborando com Santos *et al.* (2023), que relataram retenção de firmeza em mangas 'Tommy Atkins' armazenadas sob ACD. As mangas 'Palmer' armazenadas sob ACD, aos 45 dias, apresentaram firmeza de polpa ligeiramente maior que as frutas sob AR aos 30 dias, inferindo-se que o uso de ACD promoveu um ganho de pelo menos 15 dias de vida útil. Além disso, a firmeza da polpa das frutas em ACD, aos 60 dias, foi ligeiramente inferior à das frutas do AR aos 30 dias. Portanto, considerando essas características da manga 'Palmer', a tecnologia ACD utilizada em nosso estudo promoveu um ganho na vida útil superior a 15 dias e inferior a 30, segundo nossos dados. Isso demonstra que a ACD proporcionou uma maior firmeza nas mangas, conseqüentemente sugerindo uma menor degradação da estrutura celular e uma preservação mais eficaz da integridade dos tecidos durante o armazenamento. O amolecimento gradual é resultado da combinação de perda de turgor e do aumento na atividade de enzimas de degradação da parede celular, como poligalacturonase, pectina, metilesterase, β -galactosidase e β -glucanase (Hossain *et al.*, 2014).

Condições de ACD, com baixas concentrações de O_2 , contribuíram para a manutenção da firmeza das frutas, possivelmente por reduzir a atividade enzimática e prevenir danos associados ao amadurecimento acelerado. Resultados semelhantes foram encontrados por Sumual *et al.* (2017) em mangas 'Kensington Pride', que foram armazenadas em condições de AR ou em câmaras de AC, utilizando diferentes combinações de 3% de O_2 e três concentrações de CO_2 . Esse resultado ressalta os benefícios da ACD para prolongar a vida útil pós-colheita das mangas, mantendo sua qualidade sensorial e comercial por períodos mais longos.

Segundo Jongsri *et al.* (2016), o ângulo Hue é um parâmetro ideal para monitorar a mudança de coloração da casca da fruta. Essas alterações indicam a transição da cor da casca de verde para amarelo, sinalizando o amadurecimento da manga à medida que avança o processo de maturação, provavelmente devido à alteração físico-química por degradação da estrutura da clorofila e aumento na síntese dos pigmentos carotenóides. Os principais agentes responsáveis por esta degradação podem ser o sistema oxidativo, a alteração do pH e enzimas como a clorofilase. Conforme relatado por Hussain *et al.* (2015), a persistência da cor verde da casca sugere uma desaceleração no processo de amadurecimento, possivelmente devido à menor atividade da enzima clorofilase, responsável pela degradação da clorofila durante a maturação. A cor da polpa não apenas serve como um importante indicativo do ponto de colheita das frutas, mas também desempenha um papel fundamental na escolha do consumidor e na utilização das frutas pela indústria. De acordo com Silva *et al.* (2017), a mudança de cor pode ser um forte indicador de mudanças químicas e nutricionais na manga, pois, à medida que a manga amadurece, a clorofila vai sendo degradada e os níveis de carotenóides vão aumentando.

Houve um aumento significativo nos teores de sólidos solúveis nas mangas armazenadas sob AR, enquanto nas mangas armazenadas em ACD os teores foram reduzidos. Durante o amadurecimento, há transformação do amido em açúcares solúveis à medida que os carboidratos na fruta são decompostos sob a ação da enzima fosforilase em açúcares simples (Miltra & Baldwin, 1997; Hailu, 2016). Esse resultado demonstra a eficácia da ACD em retardar o amadurecimento das mangas, uma vez que os SS são indicativos diretos desse processo. A menor concentração de SS nas mangas armazenadas em ACD sugere que essas frutas mantiveram-se em estágios de maturação menos avançados em comparação com aquelas armazenadas sob refrigeração (AR), resultados semelhantes foram encontrados por Teixeira & Durigan (2011), em mangas ‘Palmer’ sob baixos níveis de oxigênio.

Em relação à acidez titulável, os resultados foram significativos entre os tratamentos aos 60 dias e aos 60 + 7, demonstrando maior manutenção da qualidade das frutas, apresentando pequenas variações ao longo do armazenamento. De acordo com Batista-Silva *et al.* (2018) esse comportamento demonstra que houve uma baixa utilização de ácidos orgânicos como substrato no metabolismo respiratório, a maior retenção de acidez nas frutas armazenadas com ACD pode estar relacionada ao baixo nível de O₂ que influencia a taxa de respiração e o metabolismo. A relação SS/AT é um importante fator determinante da preferência dos consumidores. Neste contexto, quanto menor o teor de acidez e maior o de

sólidos solúveis, mais avançada será a maturação e maior será a aceitação da fruta pelos consumidores (Koblitz, 2014).

CONCLUSÃO

Para a conservação prolongada de mangas ‘Palmer’, os níveis mínimos de O_2 de 0,3 kPa e 1.75kPa, produzidas no verão e inverno, respectivamente, se mostraram seguros para inibir ao máximo a respiração aeróbica por 21 dias, baseada na manutenção dos parâmetros de qualidade analisados. O uso de ACD em mangas ‘Palmer’ se mostrou promissor, visto que houve uma redução eficiente nas mudanças físico-químicas relacionadas ao processo de amadurecimento durante o armazenamento a 9 °C, assim como não afetou a qualidade desejada das frutas após a exposição a período de prateleira a 25 °C.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Houve uma variação nos níveis mínimos de O_2 requeridos para a máxima inibição do metabolismo aeróbico nas diferentes épocas de cultivo avaliadas, em ambas as cultivares. Estes resultados indicam os possíveis efeitos das condições climáticas da região do Submédio do Vale do São Francisco no padrão de qualidade das frutas em campo, indicando eventuais limitações relativas à uniformidade do produto ao longo do ano. Assim, os dados obtidos podem ser utilizados de forma específica em cada safra em questão, visto que não houve um comportamento padrão na demanda de O_2 pelos frutos. Além disso, a utilização do etanol como ferramenta para monitorar e determinar os níveis de O_2 se mostrou válida e eficiente.

De uma forma geral, a ACD foi mais eficiente em manter a qualidade das mangas, se comparada a atmosfera refrigerada, pois reduziu de forma eficiente o metabolismo aeróbico dos frutos, mantendo maior firmeza de polpa, menor acúmulo de sólidos solúveis, maior acidez titulável, assim como inibiu a incidência de desordens fisiológicas e podridão, o que conferiu aos frutos uma maior vida de prateleira. Assim, os resultados sugerem o potencial da tecnologia como ferramenta para o transporte de mangas a longas distâncias.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer a empresa Argofruta Comercial Exportadora Ltda. pelo fornecimento das frutas utilizadas nas pesquisas, assim como a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa (Processo: APQ-1046-5.01/22) e pela bolsa do Programa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico Regional fornecida a coorientadora deste trabalho (Processo: APQ-0015-5.01/23), bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa fornecida ao orientador deste trabalho (Processo: 305222/2023-6).

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA TEIXEIRA, G. H.; SANTOS, L. O.; CUNHA JÚNIOR, L. C.; DURIGAN, J. F. Effect of carbon dioxide (CO₂) and oxygen (O₂) levels on quality of ‘Palmer’ mangoes under controlled atmosphere storage. *Journal of food science and technology*, v. 55, n. 1, p. 145–156, 2018.
- AZZOLINI, M.; JACOMINO, A. P.; SPOTTO, M. H. Estádios de maturação e qualidade pós-colheita de goiabas ‘Pedro Sato’. *Revista Brasileira de Fruticultura*, n. 1, p. 29–31, 2004.
- BARRETT, D. M.; BEAULIEU, J. C.; SHEWFELT, R. Color, flavor, texture, and nutritional quality of fresh-cut fruits and vegetables: desirable levels, instrumental and sensory measurement, and the effects of processing. *Critical reviews in food science and nutrition*, v. 50, n. 5, p. 369–389, 2010.
- BATISTA-SILVA, W.; NASCIMENTO, V. L.; MEDEIROS, D. B.; NUNES-NESI, A.; RIBEIRO, D. M.; ZSÖGÖN, A.; ARAÚJO, W. L. Modifications in organic acid profiles during fruit development and ripening: Correlation or causation? *Frontiers in plant science*, v. 9, 2018.
- BENDER, R. J.; BRECHT, J. Respiração e produção de etanol e de etileno em mangas armazenadas sob diferentes concentrações de dióxido de carbono e oxigênio. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, v. 35, n. 5, p. 865–871, 2000.
- BENDER, R. J.; BRECHT, J. K.; SARGENT, S. A. Low storage temperature for tree ripe mangoes under controlled atmospheres with elevated CO₂ concentrations. *Journal of the science of food and agriculture*, v. 101, n. 3, p. 1161–1166, 2021.
- BRACKMANN, A; PAVANELLO, E. P.; BOTH, V.; JANISCH, D. I.; SCHMITT, O. J.; GIMÉNEZ, G. Avaliação de genótipos de morangueiro quanto à qualidade e potencial de armazenamento. *Revista CERES*, v. 58, n. 5, p. 542–547, 2011.

BRECHT, J. K. *Physiological Disorders in Fruits and Vegetables*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2019.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. *Pós-colheita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio*. 2. ed. rev. e ampl. Lavras: UFLA, 2005. 785 p.

CISSÉ, M.; POLIDORI, J.; MONTET, D.; LOISEAU, G.; DUCAMP-COLLIN, M. N. Preservation of mango quality by using functional chitosan-lactoperoxidase systems coatings. *Postharvest biology and technology*, v. 101, p. 10–14, 2015

DEUCHANDE, T.; CARVALHO, S. M. P.; GUTERRES, U.; FIDALGO, F.; ISIDORO, N.; LARRIGAUDIÈRE, C.; VASCONCELOS, M. W. Dynamic controlled atmosphere for prevention of internal browning disorders in ‘Rocha’ pear. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie [Food science and technology]*, v. 65, p. 725–730, 2016.

EL HADI, M. A. M.; ZHANG, F.-J.; WU, F.-F.; ZHOU, C.-H.; TAO, J. Advances in fruit aroma volatile research. *Molecules (Basel, Switzerland)*, v. 18, n. 7, p. 8200–8229, 2013.

EVANS, E. A.; BALLEEN, F. H.; SIDDIQ, M. Mango production, global trade, consumption trends, and postharvest processing and nutrition. Em: *Handbook of Mango Fruit*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2017.

FABI, J. P.; PERONI, F.; GOMEZ, M. Papaya, mango and guava fruit metabolism during ripening: postharvest changes affecting tropical fruit nutritional content and quality. *Fresh Produce*, v. 4, p. 56–66, 2010.

FINGER, F. L.; FRANÇA, C. F. Pré-resfriamento e conservação de hortaliças folhosas. Em: *CONGRESSO BRASILEIRO DE OLERICULTURA*, 51. Horticultura Brasileira 29. Viçosa: ABH.S5793-S5812. [s.l: s.n.].

GARCIA, L. C. Effect of antimicrobial starch edible coating on shelf-life of fresh strawberries: Effect of antimicrobial starch coating. *Packaging technology and science*, , p. 413–425, 2012.

GENÚ, P. J. C.; PINTO, A. C. A. *A Cultura da Mangueira*. v. 454, 2002.

HAILU, Z. Effects of controlled atmosphere storage and temperature on quality attributes of mango. *Journal of chemical engineering & process technology*, v. 07, n. 05, 2016.

HOSSAIN, Md Anowar; RANA, M. M.; KIMURA, Y.; ROSLAN, H. A. Changes in biochemical characteristics and activities of ripening associated enzymes in mango fruit during the storage at different temperatures. *BioMed research international*, v. 2014, p. 232969, 2014.

HUSSAIN, P. R. Retention of storage quality and post-refrigeration shelf-life extension of plum (*Prunus domestica* L.) cv. Santa Rosa using combination of carboxymethyl cellulose (CMC) coating and gamma irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*. v. 107, p. 136–148, 2015

Instrução Normativa nº 37 de 1º de outubro de 2018. Regulamento técnico de padrões de identidade e qualidade de sucos de frutas e polpas de frutas. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*. Em: Secretária de Defesa e Agropecuária. Brasília, DF: [s.n.]. v. 1p. 39–77.

JONGSRI, P.; WANGSOMBOONDEE, T.; ROJSITTHISAK, P.; SERAYPHEAP, K. Effect of molecular weights of chitosan coating on postharvest quality and physicochemical characteristics of mango fruit. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie [Food science and technology]*, v. 73, p. 28–36, 2016.

KADER, A. A.; BEN-YEHOSHUA, S. Effects of superatmospheric oxygen levels on postharvest physiology and quality of fresh fruits and vegetables. *Postharvest biology and technology*, v. 20, n. 1, p. 1–13, 2000.

KOBLITZ, M. G. B. Matérias-primas alimentícias: composição e controle de qualidade. Grupo Gen-Guanabara Koogan, 2000.

LIU, W. W.; QI, H. Y.; XU, B. H.; LI, Y.; TIAN, X. B.; JIANG, Y. Y.; XU, X. F.; LV, D. Q. Ethanol treatment inhibits internal ethylene concentrations and enhances ethyl ester production during storage of oriental sweet melons (*Cucumis melo* var. *makuwa* Makino). *Postharvest biology and technology*, v. 67, p. 75–83, 2012

LOBO, M. G.; SIDHU, J. S. Handbook of Mango Fruit: Production, Postharvest Science, Processing Technology and Nutrition. Em: SIDDIQ, M.; BRECHT, J. K.; SIDHU, J. S. (Eds.). *Biology*. [s.l.] John Wiley & Sons Ltd, 2017. p. 37–59.

MARINGGAL, B.; HASHIM, N.; AMIN TAWAKKAL, I. S. M.; MUDA MOHAMED, M. T.; HAZWAN HAMZAH, M.; ALI, M. M.; ABD RAZAK, M. F. H. Kinetics of quality changes in papayas (*Carica papaya* L.) coated with Malaysian stingless bee honey. *Scientia horticulturae*, v. 267, n. 109321, p. 109321, 2020.

MARTIN, M. S. Manutenção da qualidade de ameixas ‘Laetitia’ pela aplicação de 1MCP, etanol e tratamento térmico, 2018.

MDITSHWA, A.; FAWOLE, O. A.; OPARA, U. L. Recent developments on dynamic controlled atmosphere storage of apples—A review. *Food packaging and shelf life*, v. 16, p. 59–68, 2018.

MILTRA, S. K.; BALDWIN, E. A. Mango. In: MILTRA, S. K. (Ed.). *Postharvest physiology and storage of tropical and subtropical fruit*. Wallingford: CAB International, 1997.

NUNES, M. C. N.; EMOND, J. P.; BRECHT, J. K.; DEA, S.; PROULX, E. Quality curves for mango fruit (CV. Tommy Atkins and Palmer) stored at chilling and nonchilling temperatures. *Journal of food quality*, v. 30, n. 1, p. 104–120, 2007.

PATEL, H.; KERNDT, C. C.; BHARDWAJ, A. Physiology, Respiratory Quotient. StatPearls [Internet]. Treasure Island, 2023.

PENCHAIYA, P; TIJSKENS, L. M. M.; UTHAIRATANAKIJ, A.; SRILAONG, V.; TANSAKUL, A.; KANLAYANARAT, S. Modelling quality and maturity of ‘Namdokmai Sithong’ mango and their variation during storage. *Postharvest biology and technology*, v. 159, n. 111000, p. 111000, 2020.

PESIS, E. The role of the anaerobic metabolites, acetaldehyde and ethanol, in fruit ripening, enhancement of fruit quality and fruit deterioration. *Postharvest biology and technology*, v. 37, n. 1, p. 1–19, 2005.

ROCHA, R. M. J.; BARBOSA; MORAIS EUCLIDES ALVES DE; SILVA, G.; GALCINO DA; AMBRÓSIO, M.; MICHELLE DE QUEIROZ; ALVEZ, M. Uso do índice de degradação de amido na determinação da maturidade da manga “Tommy Atkins”. *Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal - SP*, v. 23, n. 2, p. 302 - 305, agosto 2001.

SABATO, S. F. Study of physical-chemical and sensorial properties of irradiated Tommy Atkins mangoes (*Mangifera indica* L.) in an internacional consignment. *Food Control*, v. 20, p. 284–288, 2009.

SALTVEIT, M. E. Respiratory metabolism. United States Department of Agriculture. 2014.

SALTVEIT, M. E., Respiratory metabolism. In: Yahia, E., Carrillo-Lopez, A. (Eds.), *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*. Woodhead Publishing, Sawston, pp. 73–91, 2019.

SANTOS NETO, J. P.; DE CARVALHO, L. C.; LEITE, G. W. P.; CUNHA JÚNIOR, L. C.; GRATÃO, P. L.; DE FREITAS, S. T.; ALMEIDA, D. P. F.; DE ALMEIDA TEIXEIRA, G. H.; Determination of ‘Palmer’ mango maturity indices using portable near infrared (VIS-NIR) spectrometer. *Postharvest biology and technology*, v. 130, p. 75–80, 2017.

SANTOS, L. F.; VILVERT, J. C.; DE SOUZA, T. A.; DA SILVA ALVES, J.; DA SILVA RIBEIRO, T.; NEUWALD, D. A.; DE FREITAS, S. T. (2023). Minimum O₂ levels during storage to inhibit aerobic respiration and prolong the postharvest life of “Tommy Atkins” mangoes produced in different growing seasons. *Scientia Horticulturae*, v. 318.

SILVA, G. M. C.; SILVA, W. B.; MEDEIROS, D. B.; SALVADOR, A. R.; CORDEIRO, M. H. M.; DA SILVA, N. M.; MIZOBUTSI, G. P. The chitosan affects severely the carbon metabolism in mango (*Mangifera indica* L. cv. Palmer) fruit during storage. *Food Chemistry*, v. 237, p. 372–378, 2017.

SINGH, Z.; SINGH, R. K.; SANE, V. A.; NATH, P. Mango postharvest biology and biotechnology. *Critical reviews in plant sciences*, v. 32, n. 4, p. 217–236, 2013.

SINGH, Z.; ZAHARAH, S. S. Controlled atmosphere storage of mango fruit: Challenges and thrusts and its implications in international mango trade. *Acta horticulturae*, n. 1066, p. 179–191, 2015.

SUMUAL, M. F.; SINGH, Z.; SINGH, S. P.; TAN, S. C. Fruit ripening and quality of ‘Kensington Pride’ mangoes following the controlled atmosphere storage. *Jurnal Teknologi Pertanian (Agricultural Technology Journal)*, 8(1), 2017.

TEIXEIRA, G. H. DE A.; DURIGAN, J. F. Storage of ‘Palmer’ mangoes in low-oxygen atmospheres. *Fruits*, v. 66, n. 4, p. 279–289, 2011.

THEWES, F.R.; BRACKMANN, A.; ANESE, R. DE O.; LUDWIG, V.; SCHULTZ, E.E.; DOS SANTOS, L.F.; WENDT, L.M., Effect of dynamic controlled atmosphere monitored by respiratory quotient and 1-methylcyclopropene on the metabolism and quality of ‘Galaxy’ apple harvested at three maturity stages. *Food chemistry*, v. 222, p. 84-93, 2017.

THEWES, F. R., ANESE, R. O., THEWES, F. R., LUDWIG, V., KLEIN, B., WAGNER, R., BRACKMANN, A. Dynamic controlled atmosphere (DCA) and 1-MCP: Impact on volatile

esters synthesis and overall quality of ‘Galaxy’ apples. Food packaging and shelf life, v. 26, n. 100563, p. 100563. (2020)

TRAN, D.T.; VERLINDEN, B.E.; HERTOOG, M.; NICOLAÏ, B.M.; 2015. Monitoring of extremely low oxygen control atmosphere storage of ‘Greenstar’ apples using chlorophyll fluorescence. *Scientia Horticulturae* 184, 18–22. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.11.014>

VALE, A. A. S. Alterações Químicas, Físicas e Físico-Químicas da Tangerina „Ponkan“ (*Citrus reticulata* Blanco) Durante o Armazenamento Refrigerado. *Ciência e Agrotecnologia*, p. 778–786, 2006.

VELTMAN, R. H.; VERSCHOOR, J. A.; VAN DUGTEREN, J. H. Dynamic control system (DCS) for apples (*Malus domestica* Borkh. cv. ‘Elstar’): optimal quality through storage based on products response. *Postharvest Biol. Technol.*, n. 1, p. 79–86, 2003.

VENCESLAU, W. C. D. conservação e capacidade antioxidante em goiabas ‘Paluma’. 2013. 151p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Agroindustriais - Linha de pesquisa: Tecnologia de Alimentos em Sistemas Agroindustriais). [s.l: s.n.].

VILAS BOAS, B. M.; NUNES, E. E.; FIORINI, F. V. A.; LIMA, L. C. D. O.; VILAS BOAS, E. V. D. B.; COELHO, A. H. R. Avaliação da qualidade de mangas tomy atkins minimamente processadas. *Revista Brasileira de Fruticultura*, p. 540–543, 2004.

WEBER, A. Respiratory quocient innovative method for monitoring ‘Royal Gala’ apple storage in a dynamic controlled atmosphere. *Scientia Agricola*, p. 28–33, 2015.

WEBER, A.; BRACKMANN, A.; BOTH, V.; PAVANELLO, E. P.; ANESE, R. O.; SCHORR, M. R. Ethanol reduces ripening of ‘Royal Gala’ apples stored in controlled atmosphere. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, v.88, n.1, p.403410, 2016.

WEBER, A.; NEUWALD, D. A.; KITTEMANN, D.; THEWES, F. R.; BOTH, V.; BRACKMANN, A. Influence of respiratory quotient dynamic controlled atmosphere (DCA – RQ) and ethanol application on softening of Braeburn apples. *Food chemistry*, v. 303, n. 125346, p. 125346, 2020.

WILLS, R. B. H.; MCGLASSON, W. B.; GRAHAM, D.; JOYCE, D. C. Postharvest; An introduction to the Physiology and Handling of Fruit. p. 83–99, 2007.

YIN, C.; HUANG, C.; WANG, J.; LIU, Y.; LU, P.; HUANG, L. Effect of chitosan-and alginatebased coatings enriched with cinnamon essential oil microcapsules to improve the postharvest quality of mangoes. *Materials*, v. 12, 2019.

ZAFAR, T. A.; SIDHU, J. S. Composition and nutritional properties of mangoes. Em: *Handbook of Mango Fruit*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2017. p. 217–236.

ZANELLA, A. Control of apple superficial scald and ripening - a comparison between 1-methylcyclopropene and diphenylamine postharvest treatments, initial low oxygen stress and ultralow oxygen storage. *Postharvest Biology and Technology*, n. 1, p. 69–78, 2003.

ANEXO

CAPÍTULO I

Tabela suplementar 1. Dados ambientais obtidos desde a floração completa até a colheita durante a temporada de crescimento de verão, inverno e primavera dos mangas 'Tommy Atkins'.

Período (mês/ano)	Temperatura (°C)			HR	Rad.	Precipitação
	Max.	Mean	Min.	(%)	(MJ m ⁻² d ⁻¹)	(mm)
Verão						
Dez/20	35.1	27.4	20.5	46.1	24.6	0.6
Jan/21	36.0	27.0	20.2	53.9	22.5	63.0
Feb/21	36.7	26.6	19.9	61.0	21.8	82.6
Mar/21	35.8	27.2	19.6	50.0	23.4	27.2
Média	35.9	27.0	20.0	52.7	23.0	43.3
Inverno						
Jun/21	32.9	24.6	16.2	55.5	18.1	8.2
Jul/21	34.2	23.8	16.5	58.0	17.3	3.2
Ago/21	33.2	24.2	15.1	50.5	21.8	0.2
Set/21	37.9	26.8	17.8	44.2	23.8	0.0
Média	34.5	24.8	16.4	52.0	20.2	2.9
Primavera						
Jun/22	30.7	23.7	18.3	74.6	16.2	0.4
Jul/22	30.9	23.8	17.9	69.8	15.8	0.2
Ago/22	31.6	24.3	17.9	63.5	19.0	0.0
Set/22	34.0	26.2	19.4	56.4	23.6	0.0
Out/22	34.9	27.7	21.5	55.2	24.3	0.8
Média	32.5	25.2	19.0	63.9	19.8	0.3

Max. = Temperatura máxima; Média = Temperatura média; Min. = temperaturas mínimas; HR = Humidade relativa; Rad. = Radiação solar global. Dados coletados da Estação Agrometeorológica da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE, Brasil.

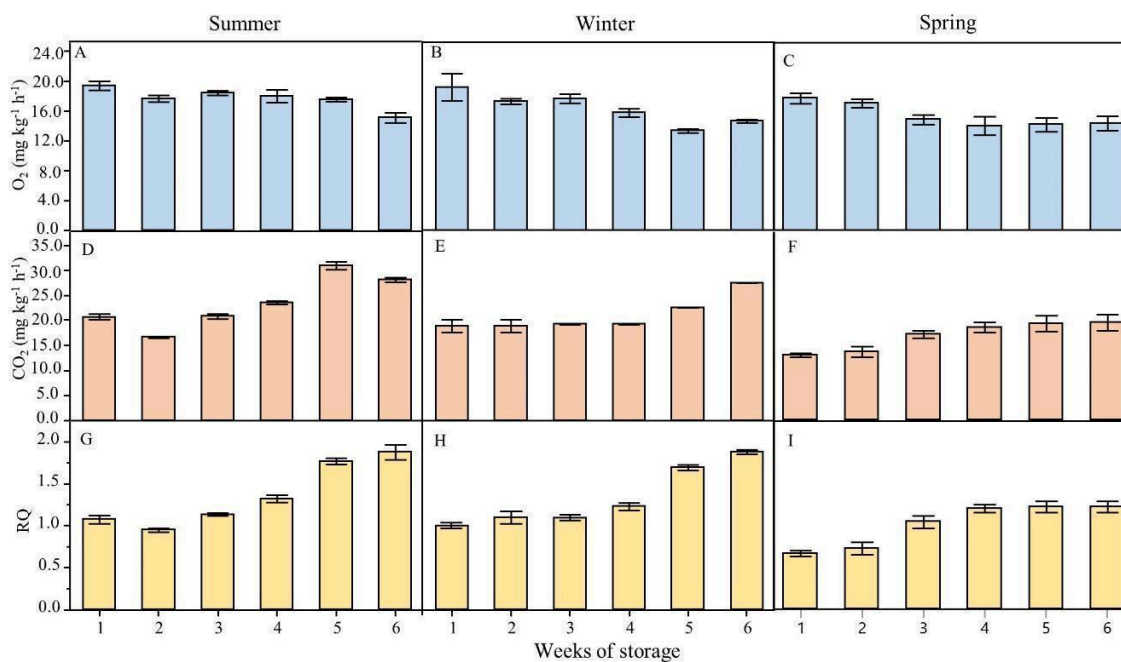


Figura 1. Níveis de consumo de O₂ (A, B e C), produção de CO₂ (D, E e F) e quociente respiratório (QR) (G, H e I) de mangas ‘Tommy Atkins’ colhidas nas safras de verão (A, D e G), inverno (B, E e H) e primavera (C, F e I) e armazenadas por seis semanas a 9 °C. Barras verticais representam médias ± erro padrão.

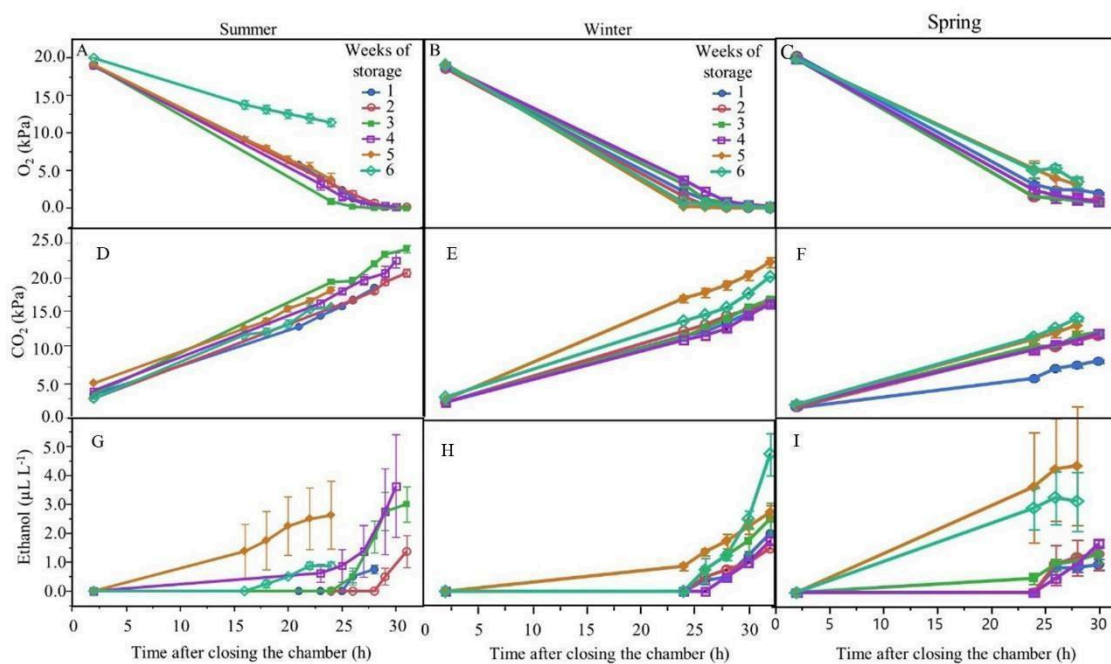


Figura 2. Pressões parciais de O₂ (A, B e C) e CO₂ (D, E e F) e concentração de etanol (G, H e I) de mangas ‘Tommy Atkins’ dentro de câmaras hermeticamente seladas produzidas nas safras de verão (A, D e G), inverno (B, E e H) e primavera (C, F e I) e armazenadas por seis semanas a 9 °C. Valores são representados com médias ± erro padrão (n = 4).

CAPÍTULO II

Tabela suplementar 1. Dados ambientais obtidos desde a floração completa até a colheita durante a temporada de crescimento de verão, inverno e primavera dos mangas 'Palmer'.

Período (mês/ano)	Temperatura (°C)			HR	Rad.	Precipitação
	Max.	Média	Min.	(%)	(MJ m ⁻² d ⁻¹)	(mm)
Verão						
Fev/21	33.6	27.0	22.3	71.3	20.7	4.1
Mar/21	34.8	27.3	21.7	62.7	22.2	0.5
Abr/21	33.4	26.8	22.3	70.1	19.2	1.9
Mai/21	30.8	24.7	19.6	71.6	17.4	0.0
Jun/21	31.3	24.5	18.8	68.6	17.8	0.7
Mean	32.7	26.0	20.9	68.9	19.5	1.44
Inverno						
Jul/21	30.9	24.0	19.1	69.7	15.9	0.3
Ago/21	31.8	24.7	18.9	61.1	21.4	0.0
Set/21	34.7	27.3	20.8	54.6	23.7	0.1
Out/21	35.5	28.2	22.1	56.2	24.7	0.7
Mean	33.3	26.0	20.3	60.4	21.4	0.3

Max. = Temperatura máxima; Média = Temperatura média; Min. = temperaturas mínimas; HR = Humidade relativa; Rad. = Radiação solar global. Dados coletados da Estação Agrometeorológica da Embrapa Semiárido, Petrolina, PE, Brasil.

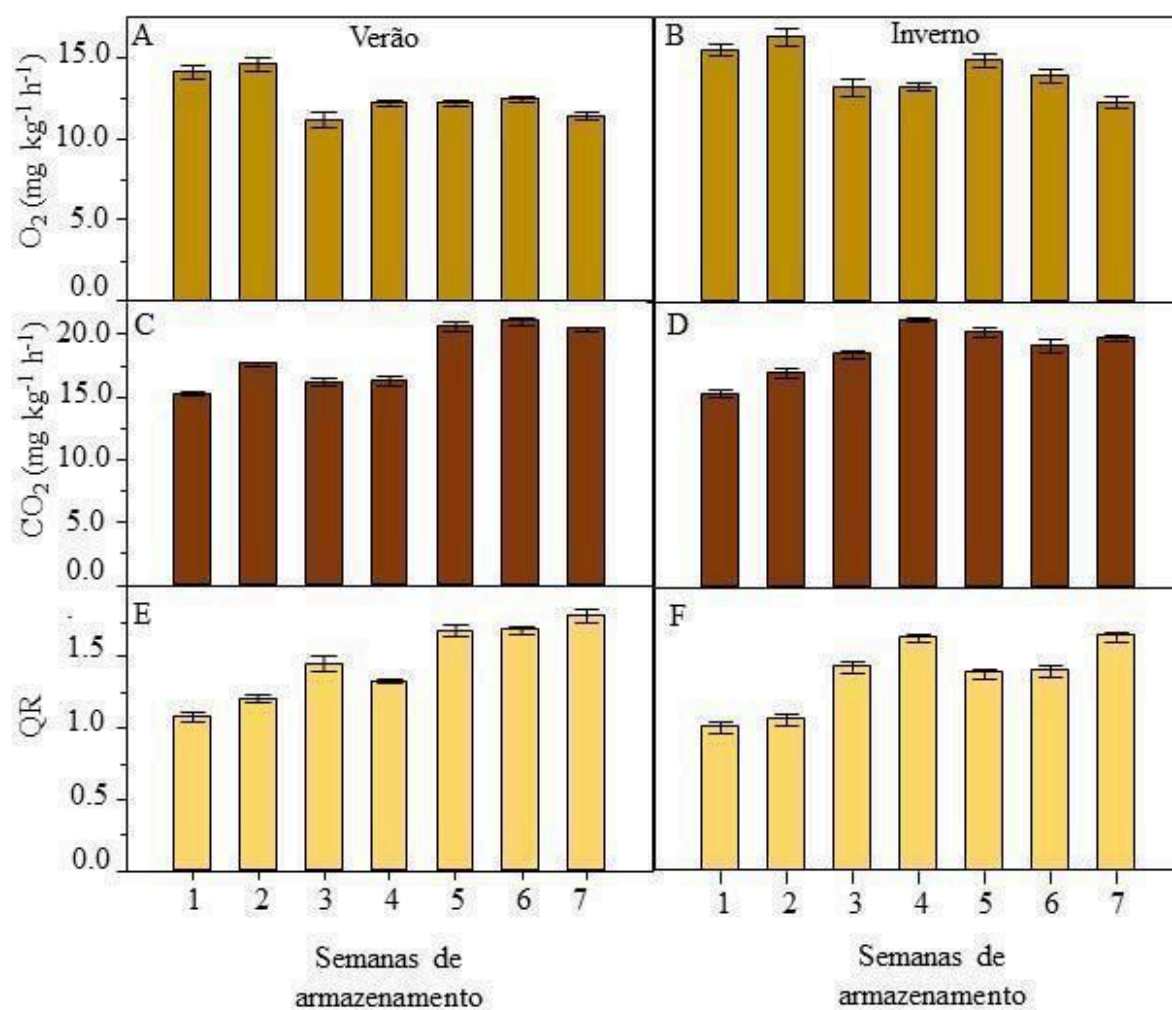


Figura 1. Níveis de consumo de O_2 (A e B), produção de CO_2 (C e D) e quociente respiratório (QR) (E e F), de mangas ‘Palmer’ colhidas nas safras de verão (A, D e E), inverno (B, D e F) armazenadas por seis semanas a 9 °C. Barras verticais representam médias $\pm$ erro padrão.

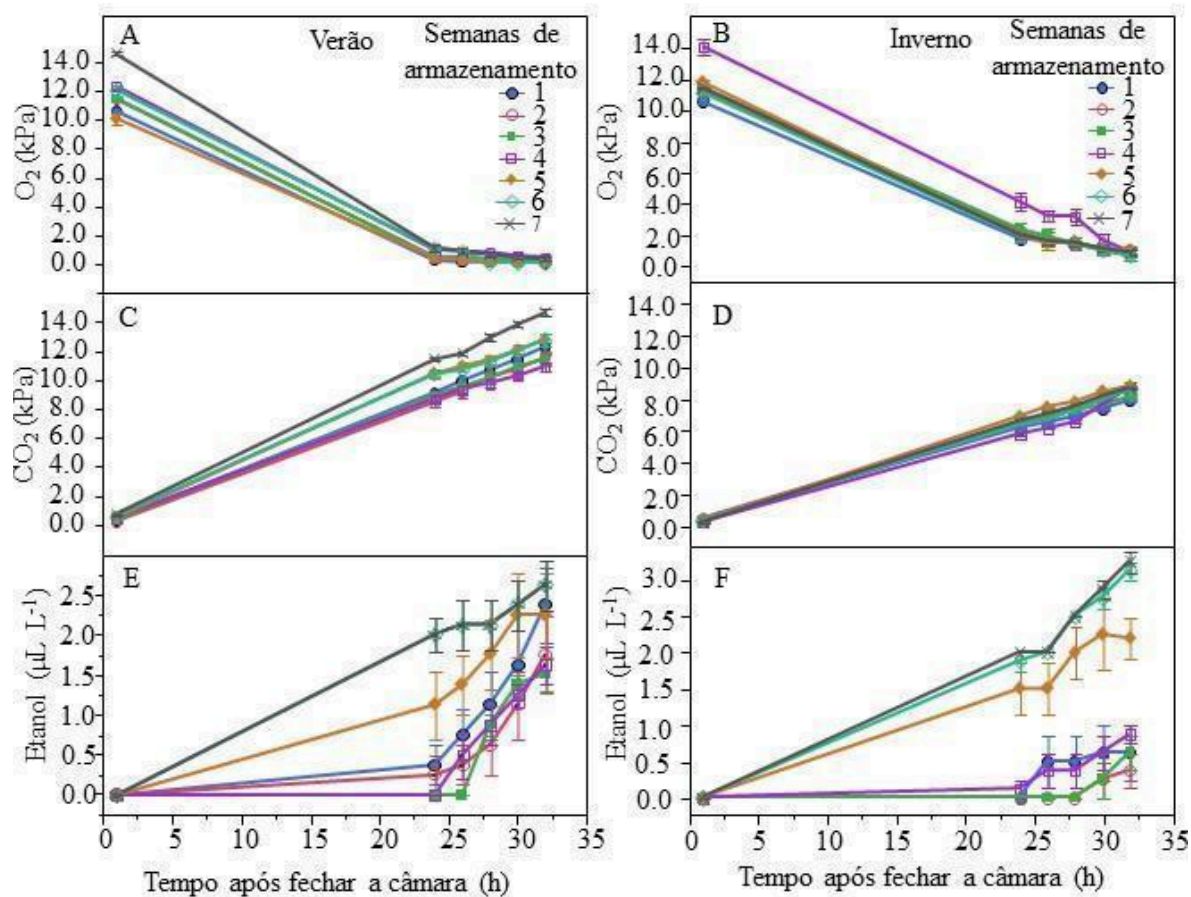


Figura 2. Pressões parciais de O_2 (A e B) e CO_2 (C e D) e concentração de etanol (E e F) de mangas ‘Palmer’ dentro de câmaras hermeticamente seladas produzidas nas safras de verão (A, D e E), inverno (B, D e F) armazenadas por seis semanas a 9 °C. Valores são representados com médias $\pm$ erro padrão ($n = 4$).