ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE ETILENO E DIÓXIDO DE CARBONO EM MAMÃO HAVAÍ

Autores: Allana Hand Santiago, Laura Rocha Candido, Jussara Moreira Coelho

Universidade Federal do Espírito Santo, Alto Universitário, s/n, Bairro Guararema, Alegre – ES - 29500-000, allanahandsantiago@gmail.com, lauracandidorocha@gmail.com, jmoreiracoelho@yahoo.com.br.

Resumo
A produção de etileno e a atividade respiratória constituem importantes indicadores das alterações fisiológicas associadas ao amadurecimento e à senescência de frutos climatéricos. Este trabalho teve como objetivo avaliar diferentes tempos de incubação em sistema fechado para estabelecer uma condição adequada à quantificação da produção de etileno (C_2H_4) e dióxido de carbono (CO_2) em mamão Havaí. Os frutos foram acondicionados em frascos hermeticamente fechados, mantidos a 25 °C e avaliados após 3, 4 e 5 horas de incubação durante o armazenamento. As concentrações de C_2H_4 e CO_2 foram determinadas diariamente, e os dados foram submetidos a análise de regressão, utilizando modelos de distribuição de pico para C_2H_4 e polinomiais para CO_2. Para a produção de C_2H_4 o modelo Gaussiano de quatro parâmetros foi escolhido para o tempo de incubação de 3 h, o modelo Weibull para 4 h e o modelo Log-normal para 5 h. A produção de CO_2 foi adequadamente descrita por modelos polinomiais nos três tempos de incubação. Nas condições avaliadas, o tempo de incubação de 3 h foi considerado o mais adequado para a determinação da produção de C_2H_4 e CO_2 em mamão Havaí.
Palavras-chave: *Carica papaya*. Climatérico. Troca gasosa. Pós-colheita. Respiração.

Área do Conhecimento: Ciências da Saúde, Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Introdução

O mamão (*Carica papaya*) é um fruto originário da América Central e do México, amplamente cultivado em regiões tropicais e subtropicais (Chung *et al*, 2023). Por apresentar comportamento climatérico, o fruto passa por um processo de rápido amadurecimento após a colheita, caracterizado pelo aumento da produção de etileno e da atividade respiratória. Esses eventos desencadeiam alterações fisiológicas e bioquímicas que afetam diretamente os atributos de qualidade do fruto. Nesse contexto, o monitoramento da atividade respiratória e da produção de etileno constitui uma importante ferramenta para acompanhar a evolução do amadurecimento e as alterações pós-colheita do mamão (Fabi; Prado, 2019; Bhatla; Lal, 2018).

A quantificação da atividade respiratória e produção de etileno pode ser realizada pelo acondicionamento dos frutos em câmaras seladas ou sistemas de fluxo contínuo, com posterior coleta de amostras do espaço livre para análise por cromatografia gasosa ou sensores de gases (Frighetto *et al*., 2018; Vries *et al*., 1996; Buccheri *et al*., 2021). Entretanto, apesar de já existirem métodos de quantificação consolidados, os protocolos utilizados podem variar quanto ao tempo de incubação, em função das diferenças na produção de etileno, na atividade respiratória e na difusão dos gases entre espécies e cultivares (Nordey *et al*., 2016; Frisina *et al*., 2018).

Nesse contexto, o tempo de incubação constitui uma importante variável metodológica e deve ser adequadamente estabelecido para cada condição experimental. Períodos muito curtos podem resultar em concentrações insuficientes para detecção, enquanto períodos excessivamente longos podem alterar a composição gasosa da câmara e interferir nos resultados (Cristescu *et al*., 2014).

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo estabelecer um tempo de incubação adequado para a quantificação da produção de etileno e atividade respiratória em mamão Havaí, visando obter uma metodologia confiável para avaliações fisiológicas durante o amadurecimento pós-colheita dessa fruta.

Metodologia

Mamões Havaí adquiridos no comércio local foram selecionados e distribuídos em três grupos, com 3 frutos cada, em sistema fechado: 3, 4 e 5 h. Os frutos foram acondicionados individualmente em frascos hermeticamente vedados com capacidade de 3 litros e mantidos a 25 °C. Após a incubação, um analisador de gases infravermelho F960 da marca Akso (Brasil), foi conectado às válvulas dos frascos, para determinar as concentrações de etileno (C_2H_4) em partes por milhão e dióxido de carbono (CO_2) em porcentagem. As avaliações foram realizadas diariamente até que não fosse detectada produção de etileno por dois dias consecutivos, sendo encerradas no 9º, 11º e 13º dia para os grupos de 3, 4 e 5 h, respectivamente.

A taxa de produção de C_2H_4 foi calculada a partir da Equação 1:

$$C_2H_4 = \frac{C \cdot 35}{t \cdot m} \qquad \text{Equação 1}$$

em que C corresponde à concentração de C_2H_4 (ppm), 35 ao fator de conversão especificado pelo fabricante, t ao período de incubação (h) e m à massa do fruto (kg), sendo os resultados expressos em mg kg^{-1} h^{-1}. A taxa de produção de CO_2 foi calculada conforme a Equação 2:

$$CO_2 = \frac{C \cdot 12}{100 \cdot t \cdot m} \cdot 1000 \qquad \text{Equação 2}$$

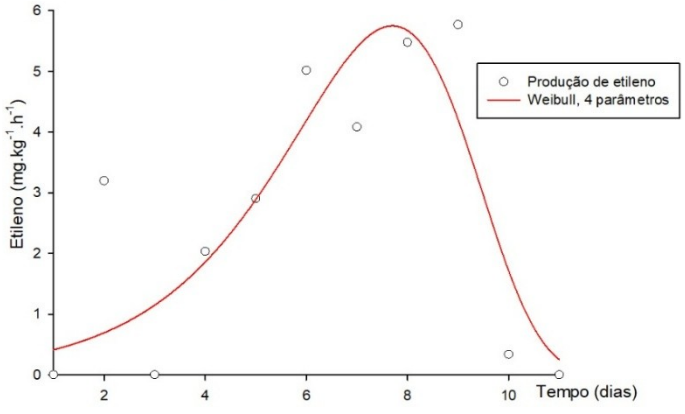
em que C corresponde à concentração de CO_2 (%), 12 ao fator de conversão especificado pelo fabricante (mL), 100 a conversão da porcentagem, t ao período de incubação (h), m à massa do fruto (g) e 1000 a conversão para kg, segundo a metodologia indicada pelo fabricante do analisador, e expressa em mL kg^{-1} h^{-1}.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de regressão. Para a produção de C_2H_4, foram avaliados modelos de distribuição de pico, selecionando-se aquele com maior ajuste aos dados. Para o CO_2, foram avaliados modelos de regressão polinomial. A adequação dos modelos foi determinada pelo coeficiente de determinação ajustado (R^2 adj), erro padrão (SE) e significância da regressão ($p<0,05$). Os modelos selecionados foram utilizados para descrever o comportamento temporal das variáveis em cada período de incubação. Os softwares Microsoft Excel e SigmaPlot foram usados para auxiliar nas análises estatísticas.

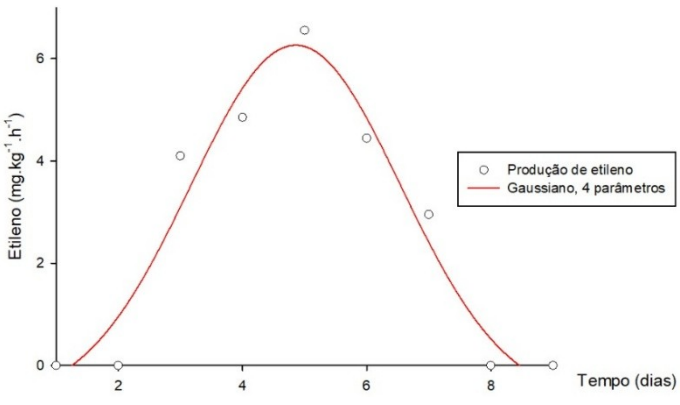
Resultados

A produção de etileno (C_2H_4) apresentou comportamento diferente entre os períodos de incubação avaliados (Figura 1).

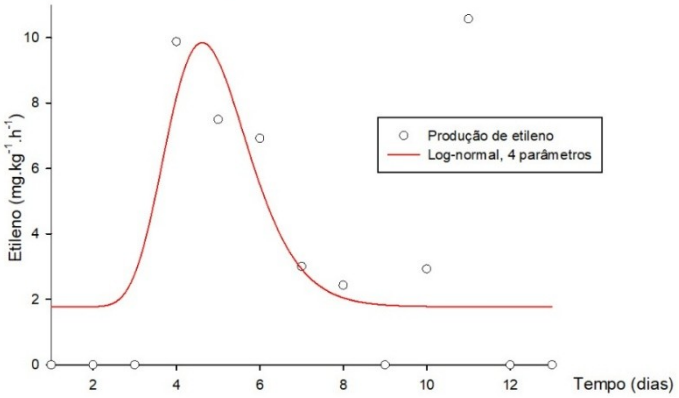
Figura 1 – Modelos ajustados para produção de etileno armazenados por (a) 3 horas; (b) 4 horas; (c) 5 horas.



(a)



(b)



Fonte: produção das autoras.

Para o período de 3 h, observou-se aumento progressivo da produção de C_2H_4 até o 5º dia, quando foi atingido o maior valor experimental, seguido de redução até valores nulos nos últimos dias de avaliação. Esse comportamento foi adequadamente descrito pelo modelo Gaussiano de quatro parâmetros, que apresentou elevado coeficiente de determinação (R^2 adj = 0,903) e significância da regressão ($p < 0,05$). Para a incubação de 4 h, a produção de C_2H_4 apresentou maior dispersão, sendo o modelo Weibull o que teve melhor ajuste, ainda que tenha o R^2 ajustado de 0,602. No tempo de incubação de 5 h, observou-se comportamento ainda mais variável, resultando no menor ajuste entre os períodos avaliados, com R^2 ajustado de 0,237 para o modelo Log-normal (Tabela 1).

Tabela 1 - Modelos matemáticos, coeficientes de determinação ajustados (R^2adj), significância da regressão ($p<0,05$) e erro padrão (SE).

	C_2H_4			
Incubação	**Modelo**	**R^2 adj**	**p do modelo**	**SE**
3 h	Gaussiano, 4 parâmetros	0,903	0,0018	0,8045
4 h	Weibull, 4 parâmetros	0,602	0,0235	1,4460
5 h	Log-normal, 4 parâmetros	0,237	0,1525	3,5034

Fonte: produção das autoras.

Assim, dentre os períodos de incubação avaliados, o tratamento de 3 h apresentou o melhor ajuste para a produção de etileno ao longo do período de armazenamento, evidenciado pelos maiores coeficientes de determinação e pela maior concordância entre os valores observados e os estimados pelo modelo. Na Tabela 2 estão apresentados os parâmetros das equações dos modelos ajustados.

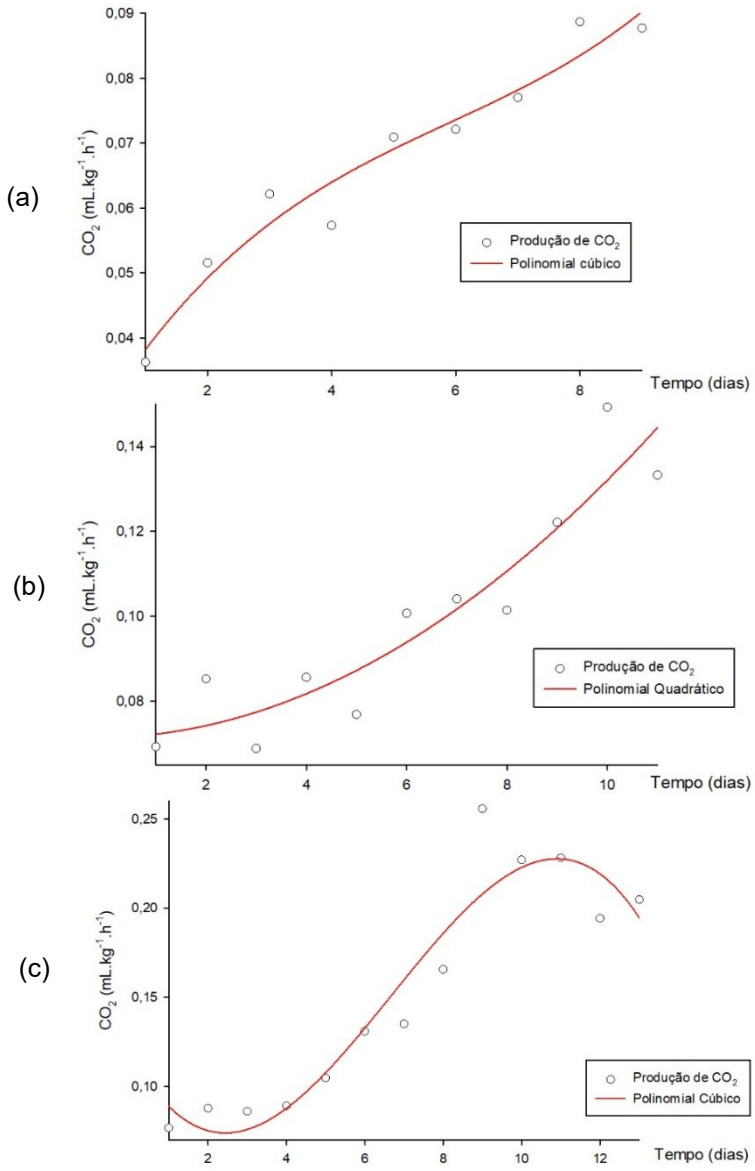
Tabela 2 – Parâmetros a, b, c, x_0 e y_0 dos modelos Gaussiano, Weibull e Log-normal ajustados aos grupos de incubação de 3, 4 e 5 horas, respectivamente.

	C_2H_4				
Incubação	**(a)**	**(b)**	**(c)**	**(x_0)**	**(y_0)**
3 h	6,988	1,6911	—	4,8575	−0,7235
4 h	5,75	201769,7156	108677	7,6999	—
5 h	38,0944	0,211	—	4,8274	1,7754

Fonte: produção das autoras.

A produção de CO_2 apresentou comportamento diferente entre os períodos de incubação avaliados. Os gráficos de dispersão com os modelos ajustados estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Modelos ajustados para produção de CO_2 armazenados por (a) 3 horas; (b) 4 horas; (c) 5 horas.



Fonte: produção das autoras.

A produção de CO_2 apresentou aumento ao longo da incubação, com comportamento temporal adequadamente descrito por modelos polinomiais nos três períodos de incubação avaliados. Para a incubação de 3 h, o ajuste polinomial cúbico apresentou R^2 ajustado de 0,922, enquanto, para 4 h, o modelo polinomial quadrático apresentou R^2 ajustado de 0,840. Para 5 h, o comportamento foi descrito por modelo polinomial cúbico, com R^2 ajustado de 0,876 (Tabela 3).

Tabela 3 - Modelos matemáticos, coeficientes de determinação ajustados (R^2 adj), significância da regressão ($p<0,05$) e erro padrão (SE).

	Produção de CO2			
Incubação	**Modelo**	**R^2 adj**	**p do modelo**	**SE**
3 h	Polinomial cúbico	0,922	0,0011	0,00479
4 h	Polinomial quadrático	0,840	0,0003	0,01053
5 h	Polinomial cúbico	0,876	>0,0000	0,02227

Fonte: produção das autoras.

Todos os modelos apresentaram significância estatística ($p < 0,05$), indicando associação significativa entre o período de incubação e a produção de CO_2. Os maiores coeficientes de determinação foram observados para os incubações de 3 e 5 h, enquanto o tempo de incubação de 4 h apresentou menor, porém ainda elevada, capacidade descritiva.

Na Tabela 4 estão apresentados os parâmetros das equações dos modelos ajustados.

Tabela 4 – Parâmetros y_0, a, b e c dos modelos polinomiais cúbicos ajustados aos grupos de incubação de 3 e 5 horas e modelo polinomial quadrático ajustado ao grupo de 4 horas.

	Produção de CO2			
Incubação	**(y_0)**	**(a)**	**(b)**	**(c)**
3 h	0,02391	0,016213	−0,002000	0,000113
4 h	0,07138	0,000286	0,000578	—
5 h	0,11966	−0,040481	0,010155	−0,000508

Fonte: produção das autoras.

De forma geral, a produção de etileno apresentou maior capacidade de ajuste matemático para a incubação de 3 h, enquanto a produção de CO_2 apresentou comportamento temporal consistente nos três períodos avaliados. A representação gráfica dos dados experimentais e das curvas ajustadas permitiu visualizar as diferenças na dinâmica das respostas em função do período de incubação.

Discussão

A produção de etileno (C_2H_4) apresentou diferentes padrões temporais entre os períodos de incubação avaliados, sendo observado, no período de 3 h, aumento progressivo da produção até o quinto dia de avaliação, seguido de redução nos dias subsequentes. Esse comportamento é característico de frutos climatéricos, como o mamão, e está relacionado com o avanço do amadurecimento (Bhatla & Lal, 2018). Oliveira *et al*., (2015) verificaram que a produção de etileno em frutos de mamão aumentou inicialmente, atingiu seu máximo no estádio intermediário de amadurecimento e posteriormente diminuiu para níveis basais, enquanto a respiração dos frutos não acompanhou o declínio da produção de etileno, permanecendo elevada por um período mais prolongado.

A capacidade de ajuste do modelo para o período de 3 h foi superior à observada nos demais tempos de incubação. A maior dispersão dos dados nos períodos mais longos indica que o aumento do tempo de permanência dos frutos no sistema fechado não resultou necessariamente em maior capacidade de quantificação da produção de etileno. Além disso, a maior acumulação de gases no sistema fechado pode alterar as condições internas do sistema e a dinâmica de troca gasosa do fruto (Cristescu *et al*., 2014). Nesse sentido, a escolha inadequada das condições de análise pode resultar em medidas imprecisas, sendo necessário ajustar o período de medição às características do sistema utilizado (Barbosa *et al*., 2018). Os resultados indicam que o período de 3 h proporcionou o melhor ajuste dos modelos para a produção de etileno. Entretanto, esse resultado deve ser interpretado considerando que a produção de etileno é influenciada por fatores como cultivar, estádio de maturação, temperatura, condições de incubação, massa dos frutos e características do sistema de coleta (Nordey *et al*., 2016; Frisina *et al*., 2018). Assim, o resultado observado para o período de 3 h é específico das condições experimentais avaliadas.

Em relação à produção de CO_2, os modelos polinomiais apresentaram elevado poder explicativo nos três períodos de incubação avaliados, indicando que essa variável apresentou menor sensibilidade ao tempo de incubação nas condições experimentais. O aumento da produção de CO_2 representa a intensificação da atividade respiratória dos frutos, que é influenciada pela fisiologia do fruto e sofre alterações durante o período pós-colheita. Em mamão, o aumento da respiração ocorre paralelamente às transformações fisiológicas e bioquímicas características do amadurecimento (Barbosa *et al*., 2018). Nesse sentido, a diferença entre os padrões de produção de C_2H_4 e CO_2 observados no presente estudo é fisiologicamente plausível, uma vez que, embora ambos estejam associados ao metabolismo do fruto e ao processo de amadurecimento, suas dinâmicas não são necessariamente coincidentes (Oliveira *et al*., 2015). A produção de CO_2 apresentou comportamento temporal consistente nos três períodos de incubação, indicando menor influência do tempo de incubação sobre sua quantificação.

Conclusão

Nas condições experimentais avaliadas, o período de incubação de 3 h foi selecionado como o mais adequado para a determinação da produção de etileno em mamão Havaí, por apresentar o maior R^2 ajustado, o menor erro padrão da estimativa e significância estatística do modelo. A produção de CO_2, por sua vez, apresentou menor sensibilidade ao tempo de incubação, com comportamento consistente nos diferentes períodos analisados. Dessa forma, o período de 3 h foi estabelecido como referência para as avaliações subsequentes da produção de etileno nos frutos, considerando as condições experimentais empregadas neste estudo.

Referências

BARBOSA, Nayara Cantarino; VIEIRA, Ricardo Augusto Mendonça; DE RESENDE, Eder Dutra. Modeling the respiration rate of Golden papayas stored under different atmosphere conditions at room temperature. **Postharvest Biology and Technology**, v. 136, p. 152-160, 2018.

BHATLA, Satish C.; LAL, Manju A. **Plant physiology, development and metabolism**. Springer Nature, 2023. Doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-2023-1.

BUCCHERI, Marina *et al*. Dynamic changes of antioxidants and fermentative metabolites in apple peel in relation to storage, controlled atmosphere, and initial low oxygen stress. **Scientia Horticulturae**, v. 288, p. 110312, 2021.

CHUNG, Sun Woo *et al*. Spatial and compositional variations in fruit characteristics of papaya (Carica papaya cv. Tainung No. 2) during ripening. **Plants**, v. 12, n. 7, p. 1465, 2023. https://doi.org/10.3390/plants12071465.

CRISTESCU, Simona M. *et al*. Research tools: Ethylene detection. In: **Ethylene in plants**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. p. 263-286.

DE VRIES, H. S. M. *et al*. Ethylene and CO2 emission rates and pathways in harvested fruits investigated, in situ, by laser photothermal deflection and photoacoustic techniques. **Postharvest Biology and Technology**, v. 8, n. 1, p. 1-10, 1996.

FABI, João Paulo; DO PRADO, Samira Bernardino Ramos. Fast and furious: ethylene-triggered changes in the metabolism of papaya fruit during ripening. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 535, 2019. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00535.

FRIGHETTO, R. T. S. *et al*. Quantificação da respiração e de etileno em vegetais por cromatografia gasosa com detectores em série. Embrapa Meio Ambiente, 2018.

FRISINA, Christine *et al*. A revised method for the field collection and storage of fruit ethylene samples using evacuated vials. **Scientia Horticulturae**, v. 236, p. 123-126, 2018.

NORDEY, Thibault *et al*. Factors affecting ethylene and carbon dioxide concentrations during ripening: Incidence on final dry matter, total soluble solids content and acidity of mango fruit. **Journal of plant physiology**, v. 196, p. 70-78, 2016.

OLIVEIRA, M. G. *et al*. Involvement of AOX and UCP pathways in the post-harvest ripening of papaya fruits. **Journal of plant physiology**, v. 189, p. 42-50, 2015.