



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

POSGRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO RESPIRATORIO DE FRUTOS DE AGUACATE 'HASS' EN ENVASES INTELIGENTES

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

Presenta:

LUCIANO LÓPEZ GÓMEZ



Bajo la supervisión de: SALVADOR VALLE GUADARRAMA, DR.



Chapingo, Estado de México, noviembre de 2025

**MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO RESPIRATORIO DE FRUTOS DE
AGUACATE 'HASS' EN ENVASES INTELIGENTES**

Tesis realizada por **LUCIANO LÓPEZ GÓMEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA AGROALIMENTARIA

DIRECTOR:



DR. SALVADOR VALLE GUADARRAMA

ASESORA:



DRA. DIANA GUERRA RAMÍREZ

ASESOR:



DR. ERICH VON BORRIES MEDRANO

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
DEDICATORIAS	x
AGRADECIMIENTOS	xi
DATOS BIOGRÁFICOS	xii
RESUMEN GENERAL	xiii
GENERAL ABSTRACT	xiv
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. Objetivos	3
1.2. Hipótesis	4
1.3. Descripción general del trabajo	4
1.4. Literatura citada	4
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. Historia y origen del aguacate	7
2.2. Morfología y fisiología del aguacate	7
2.3. Variedades del aguacate	9
2.4. Índice de madurez y maduración del aguacate	10
2.5. Efectos fisiológicos y bioquímicos de atmósferas modificadas	11
2.5.1. Almacenamiento en atmósfera modificada	11
2.5.2. Efectos de la atmósfera modificada	12
2.5.3. Envasado en atmósfera modificada	13
2.5.4. Almacenamiento en condiciones de bajo O ₂ y alto CO ₂	15
2.5.5. Efecto Pasteur	17

2.6.	Envases inteligentes (<i>smart packaging</i>).....	17
2.6.1.	Envase inteligente (<i>intelligent packaging</i>).....	18
2.6.2.	Indicadores	19
2.6.3.	Indicadores de frescura	19
2.6.4.	Materiales utilizados para el desarrollo de etiquetas inteligentes colorimétricos	20
2.6.4.1.	Materiales a base de biopolímeros	20
2.6.4.2.	Colorantes.....	23
2.6.4.3.	Materiales para capas externa e interna en etiquetas indicadoras	27
2.7.	Literatura citada	29
3.	DESARROLLO DE UNA BIOPELÍCULA INDICADORA COLORIMÉTRICA PARA MONITOREAR CO ₂	38
3.1.	Introducción	40
3.2.	Materiales y métodos	41
3.2.1.	Materiales	41
3.2.2.	Bases para el desarrollo de las biopelículas indicadoras.....	42
3.2.2.1.	Preparación de solución de indicadores acido-base	42
3.2.2.2.	Sensibilidad de la solución indicadora en función del pH....	42
3.2.2.3.	Sensibilidad a contacto con CO ₂	43
3.2.3.	Desarrollo de la biopelícula indicadora sensible a pH.....	44
3.2.4.	Caracterización de la biopelícula indicadora sensible a pH	44
3.2.5.	Validación de la biopelícula indicadora en condiciones reales de envasado.....	45
3.2.6.	Análisis del cambio de color	46
3.2.7.	Análisis de CO ₂ en el espacio de cabeza	46
3.2.8.	Validación de la biopelícula indicadora en condiciones reales de envasado con microperforaciones	47
3.2.9.	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	47

3.2.10.	Análisis de datos	48
3.3.	Resultados y discusión	48
3.3.1.	Sensibilidad de la solución indicadora en función del pH	48
3.3.2.	Sensibilidad del indicador causado por CO ₂	49
3.3.3.	Caracterización de la biopelícula indicadora sensible a pH	51
3.3.4.	Resultado de la validación de la biopelícula indicadora en condiciones reales de envasado	52
3.3.4.1.	Concentración de CO ₂ en el espacio de cabeza	52
3.3.4.2.	Cambios de color de la biopelícula indicadora	53
3.3.5.	Resultado de la validación de la biopelícula indicadora en condiciones reales de envasado con microperforaciones	55
3.3.6.	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	56
3.4.	Conclusión	58
3.5.	Literatura citada	59
4.	ETIQUETAS SENSIBLES AL CO ₂ PARA EL MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO RESPIRATORIO DE FRUTOS DE AGUACATE 'HASS'	63
4.1.	Introducción	65
4.2.	Materiales y métodos	66
4.2.1.	Materiales	66
4.2.2.	Desarrollo de las etiquetas indicadoras sensible al pH	67
4.2.3.	Ensayos preliminares	68
4.2.4.	Determinación de espesor, propiedades mecánicas y contenido de humedad	69
4.2.5.	Evaluación del cambio de color de la etiqueta indicadora en respuesta a diferentes concentraciones de CO ₂	70
4.2.6.	Validación de la etiqueta indicadora en condiciones reales de envasado	70
4.2.7.	Análisis de la concentración de CO ₂ en el envase	71
4.2.8.	Análisis del cambio de color de las etiquetas indicadoras	71

4.2.9.	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	72
4.2.10.	Análisis estadístico	72
4.3.	Resultados y discusión	72
4.3.1.	Cambio de color de la etiqueta indicadora durante los ensayos preliminares.....	72
4.3.2.	Espesor, propiedades mecánicas y contenido de humedad	74
4.3.3.	Cambio de color de las etiquetas indicadoras en respuesta a diferentes concentraciones de CO ₂	75
4.3.4.	Resultados de la validación de la etiqueta indicadora en condiciones reales de envasado con microperforaciones	78
4.3.4.1.	Concentración de CO ₂ en el envase	78
4.3.4.2.	Cambio de color de las etiquetas indicadoras.....	79
4.3.5.	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)	84
4.4.	Conclusión	87
4.5.	Literatura citada	88
5.	CONCLUSIONES GENERALES.....	92

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Algunos indicadores ácido-base sensibles a pH y sus propiedades, adaptado a (Zhang & Lim, 2018).	24
Cuadro 2. Valores promedio de luminosidad, ángulo de matiz y cromaticidad en función del pH.	48
Cuadro 3. Propiedades físicas y mecánicas de las etiquetas desarrollada para la detección de CO ₂	75
Cuadro 4. Concentraciones de CO ₂ en frutos almacenados a 24 °C durante 20 h con diferentes niveles de microperforación.	86
Cuadro 5. Atributos de color (L, Hue, Croma y ΔE) de etiquetas indicadoras durante el almacenamiento de frutos a 24°C bajo diferentes niveles de microperforación.	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Morfología del fruto de aguacate.	8
Figura 2. Cambios de color del rojo de metilo en sus formas ácidas y básicas (Yadav et al., 2024).....	25
Figura 3. Cambios de color en los diferentes pH de los indicadores ácido-base.	43
Figura 4. Esquema de elaboración de las biopelículas indicadoras.	44
Figura 5. Almacenamiento de aguacate ‘Hass’ en envases de PET con la biopelícula indicadora sensible al pH.....	45
Figura 6. Unidad experimental para el monitoreo de CO ₂ a 24 °C.....	47
Figura 7. Variación de tonalidades de la mezcla de indicador acido-base (rojo de metilo, azul de bromotimol y azul de timol) en función del pH.	49
Figura 8. A: regresión lineal entre los valores de Hue y pH, B: regresión lineal entre los valores de Hue y porcentaje de transmitancia.	50
Figura 9. Ajuste de datos micromoles de CO ₂ reaccionados contra transmitancia.	50
Figura 10. Cinética de color de biopelículas expuesto a una concentración de CO ₂ a 24 °C.	52
Figura 11. Cambios de color y concentración de dióxido de carbono durante el almacenamiento del fruto de aguacate ‘Hass’ a 24 °C.	54
Figura 12. Correlación de los valores de la ΔE y las concentraciones de CO ₂	55
Figura 13. Cambio en la concentración de CO ₂ y ΔE durante el almacenamiento de frutos de aguacate ‘Hass’ a 24 °C, con diferentes niveles de microperforación; concentraciones de CO ₂ (a), sin perforación (b), con 10 micropeforaciones (c), y con 20 microperforaciones (d).Los valores corresponden al promedio de tres repeticiones.....	56

Figura 14. Los espectros FTIR de biopelículas que contienen indicadores ácido-base (BP); biopelículas después del almacenamiento con papel filtro (BP-PF-CO ₂) y biopelículas después del almacenamiento sin papel filtro (BP-CO ₂)......	58
Figura 15. Proceso de fabricación de la etiqueta indicadora.....	68
Figura 16. Etiquetas indicadores sensibles al CO ₂ en diferentes niveles de pH que contiene tres indicadores (RM, ABT y AT).	73
Figura 17. Etiquetas indicadoras sensibles al CO ₂ , que contiene tres indicadores (RM, ABT y AT) en diferentes concentraciones.	74
Figura 18. Perfil del cambio de color de las etiquetas indicadoras en diferentes concentraciones de CO ₂	76
Figura 19. Cambios en la concentración de CO ₂ durante el almacenamiento en frutos de aguacate 'Hass' a 24 ° C con diferentes niveles de microperforación: sin perforación (M0), con 10 microperforaciones (M10) y con 20 microperforaciones (M20).	78
Figura 20. Cambio de color total (ΔE) y concentración de CO ₂ durante el almacenamiento de frutos a 24° C con diferentes niveles de perforación: sin perforación (a, b), con 10 microperforaciones (c, d), y con 20 microperforaciones (e, f). Las barras representan el error estándar de la media de tres repeticiones.	80
Figura 21. Resultados de los espectros FTIR de las etiquetas indicadoras basadas en carboximetilcelulosa con indicadores ácido-base: etiquetas sin reaccionar (CMC-IND), etiquetas después del almacenamiento con dos indicadores (CMC-RM-ABT) y con tres indicadores (CMC-RM-ABT-AT).	85

DEDICATORIAS

A Dios, por ser la base fundamental de mi vida y por concederme la capacidad para culminar este proyecto de investigación, porque "Jehová da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia" (Proverbios 2:6).

A mis padres, Aureliano López y Carmela Gómez por su amor y apoyo incondicional en todo momento.

A Eugenia Gomez Rodríguez, por su amor, comprensión y apoyo constante, y por acompañarme siempre en los momentos más importantes de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo económico brindado durante la realización de este proyecto de investigación

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría, así como por los conocimientos, experiencias y valores adquiridos durante mi formación profesional.

Al Dr. Salvador Valle Guadarrama cuya dirección, revisión y asesoría fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

A la Dra. Diana Guerra Ramírez por su apoyo y atención, cuya orientación y compromiso contribuyeron de manera significativa al desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Erich Von Borries Medrano por el apoyo, aportes y orientación, los cuales contribuyeron al desarrollo de esta investigación

A la laboratorista Araceli Ayala, por su colaboración técnica y apoyo constante, facilitando los recursos y materiales necesarios para la realización de esta investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Luciano López Gómez
Fecha de nacimiento	10 de diciembre de 1996
Lugar de nacimiento	Col. La Siberia, Chanal, Chiapas
CURP	LOGL961210HCSPMC00
Profesión	Ingeniero Agroindustrial
Cedula profesional	13962280

Desarrollo académico

Bachillerato	COBACH Plantel 61 Chanal
Licenciatura	Universidad Autónoma Chapingo

RESUMEN GENERAL

MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO RESPIRATORIO DE FRUTOS DE AGUACATE 'HASS' EN ENVASES INTELIGENTES

Los productos hortofrutícolas son altamente perecederos debido a su actividad metabólica continua después de la cosecha, como la respiración y la transpiración, lo que afecta su calidad y vida útil. El envasado en atmósfera modificada permite ralentizar los procesos fisiológicos y bioquímicos; sin embargo, presenta limitaciones, ya que no es posible evaluar la calidad del producto sin abrir el envase. Los envases inteligentes con indicadores sensibles al pH representan una alternativa viable, económica y no destructiva para monitorear la calidad de los productos durante el almacenamiento. Por ello, el objetivo de esta investigación fue desarrollar etiquetas inteligentes para monitorear cambios de concentración de CO₂ en el espacio de cabeza del envase, para mejorar el manejo postcosecha de los productos hortícolas. Se realizaron dos etapas. Primero, se elaboró una biopelícula indicadora a base de carboximetilcelulosa con una mezcla de indicadores ácido-base: rojo de metilo (RM), azul de bromotimol (ABT) y azul de timol (AT). Su sensibilidad al CO₂ se evaluó en solución, en forma de película y en aplicación real con frutos de aguacate 'Hass'. Después, se diseñaron etiquetas multicapa, una con dos indicadores (RM, ABT) y otra con tres (RM, ABT, AT). Su efectividad se evaluó mediante simulaciones con concentraciones conocidas de CO₂ y se validó en condiciones reales de envasado con aguacate 'Hass'. Las biopelículas mostraron cambios de color perceptibles al CO₂, confirmando su sensibilidad, pero ello estuvo limitado a bajas concentraciones. Las etiquetas con dos indicadores presentaron una mejor respuesta, con alta correlación entre el cambio de color y el incremento de CO₂. Se hicieron espectros de FTIR, que confirmaron las respuestas de los indicadores durante el proceso de almacenamiento. En conclusión, las etiquetas con dos indicadores demostraron ser una herramienta útil para monitorear la concentración de CO₂ y predecir la calidad de frutos envasados en atmósferas modificadas.

Palabras clave: *Persea americana* Mill., atmósfera modificada con microperforado, etiqueta inteligente, indicadores ácido-base, biopolímeros.

Tesis de Maestría en Ciencias, Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Luciano López Gómez

Director de tesis: Salvador Valle Guadarrama, Dr.

GENERAL ABSTRACT

MONITORING OF RESPIRATORY BEHAVIOR OF 'HASS' AVOCADO FRUITS IN INTELLIGENT PACKAGING

Fruits and vegetables are highly perishable due to their continuous metabolic activity after harvest, such as respiration and transpiration, which affects their quality and shelf life. Modified atmosphere packaging (MAP) slows down physiological and biochemical processes; however, this technique has limitations, as it is not possible to assess product quality without opening the package. Intelligent packaging with pH-sensitive indicators represents a viable, economical, and non-destructive alternative for monitoring product quality during storage. The objective of the work was to develop intelligent labels to monitor changes in CO₂ concentration in the headspace of the packaging, to improve the postharvest handling of fruits and vegetables. Two stages were performed. First, an indicator biofilm based on carboxymethylcellulose was prepared with a mixture of three acid-base indicators: methyl red (MR), bromothymol blue (BTB), and thymol blue (TB). The sensitivity to CO₂ was evaluated in solution, as a film, and in actual applications with 'Hass' avocado fruits. Subsequently, multilayer labels were designed, one with two indicators (MR, BTB) and another with three (MR, BTB, TB). The label's effectiveness was evaluated through simulations with known CO₂ concentrations and validated under actual packaging conditions with 'Hass' avocado fruits. The biofilms showed perceptible color changes in response to CO₂, confirming their sensitivity, but they were limited at low concentrations. The labels with two indicators exhibited a better response, with a high correlation between the change in color and the increase in CO₂. FTIR spectra were performed and confirmed the indicators responses during the storage process. In conclusion, the labels with two indicators proved to be a useful tool for monitoring CO₂ concentration and predicting the quality of fruit packaged in MAP.

Key words: *Persea americana* Mill., acid-base indicators, biopolymers, intelligent packaging, microperforated modified atmosphere.

Master of Science Thesis, Graduate program in Agri-Food Science and Technology, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Luciano López Gómez

Thesis advisor: Salvador Valle Guadarrama. Dr.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Los productos hortofrutícolas son altamente perecederos, ya que sus procesos metabólicos y actividades fisiológicas continúan después de la cosecha. Por ello, son muy susceptibles a factores como la temperatura, la humedad y la composición de los gases, entre otros, los cuales pueden provocar cambios significativos en su calidad (Du et al., 2025; Rashvand et al., 2023). Por ello, la vida útil de los productos hortofrutícolas en postcosecha es limitada, por lo que deben ser cosechados, manipulados, envasados y almacenados con tecnologías adecuadas para mantener su calidad hasta el consumo (Dwibedi et al., 2024).

La utilización del sistema de envasado en atmósfera modificada se ha convertido recientemente en un método frecuente para conservar la frescura, logrando el efecto deseado a través de niveles elevados de dióxido de carbono y niveles reducidos de oxígeno (Chang et al., 2025), mediante la interacción natural entre la respiración del producto y la permeabilidad de la película (Ghidelli & Pérez-Gago, 2018; Mahajan & Lee, 2023). Este método ralentiza los procesos metabólicos de las frutas como la respiración aeróbica y la actividad enzimática, retrasando la maduración y la senescencia, manteniendo al mismo tiempo los parámetros de calidad organoléptica, de manera que la vida útil y comercial de los productos se alarga (Cukrov et al., 2019). Sin embargo, si la reducción del nivel de oxígeno es excesiva y la concentración desciende por debajo del punto de compensación anaeróbica, el metabolismo de la fruta cambia de la respiración aeróbica a la anaeróbica o fermentativa, y la producción de CO₂ incrementa significativamente. Esto da lugar a la producción de etanol y acetaldehído, que son perjudiciales para el producto (Boeckx, Pols, et al., 2019; Saltveit, 2020; Valle-Guadarrama et al., 2013). Por lo tanto, es indispensable evitar las condiciones que favorecen la fermentación.

El uso de atmósferas modificadas aún presenta desafíos a nivel comercial en cuanto a control de calidad de los productos envasados, ya que resulta imposible verificar de forma rápida y económica si el envase está correctamente sellado (Wang et al., 2019), si mantiene las concentraciones óptimas de gas o si el sistema de conservación funciona adecuadamente y garantiza la calidad del producto para su consumo. En este contexto, se ha generado un gran interés por desarrollar un método rápido, simple, de bajo costo y no destructivo (Lin et al., 2023), capaz de monitorear la calidad de los alimentos en tiempo real y proporcionar información precisa (Jia et al., 2025). La tecnología que responde a esta necesidad está dada por los envases inteligentes. Estos sistemas incorporan indicadores, sensores y sistemas de control de gases cuya función es monitorear el estado de los alimentos envasados y proporcionar información en tiempo real sobre su calidad durante el almacenamiento, transporte y comercialización (Dirpan et al., 2021; Du et al., 2025; Kuswandi et al., 2011). Los indicadores de frescura son materiales que pueden usarse en envases inteligentes y permiten el monitoreo en tiempo real, de forma no invasivo y no destructivo, de la calidad y seguridad de los alimentos (Obaidi et al., 2022). La ventaja de estos sistemas de envasado es que permiten a los consumidores comprobar la frescura y la seguridad de los productos mediante un cambio de color. Esto garantiza la inocuidad alimentaria y establece un vínculo de comunicación directo entre el envase y el consumidor (Karaca et al., 2023).

El problema principal del envasado en atmósfera modificada corresponde a la dificultad de controlar la composición gaseosa dentro del envase y, por tanto, del metabolismo respiratorio de la fruta, ya que la reducción excesiva de la concentración de O_2 puede inducir fermentación, lo que genera producción y acumulación excesiva de CO_2 , olores desagradables y deterioro acelerado de la calidad del producto. A nivel laboratorio, es factible utilizar sensores instrumentales para monitorear la composición de gases dentro del envase. No obstante, ello resulta impráctico y costoso en la cadena de distribución, una vez que el producto está en el envase final. En tal sentido, el uso de indicadores

colorimétricos dentro de los envases puede ser una alternativa viable para monitorear el metabolismo respiratorio del producto, tomando como indicador a los niveles de CO₂, porque su acumulación dentro del producto se puede relacionar con el pH. De manera particular, investigaciones previas han caracterizado la transición metabólica oxidativa-fermentativa de frutos de aguacate 'Hass' (Valle-Guadarrama et al., 2013), y se han mostrado que, efectivamente, el metabolismo, aerobio o anaerobio, se correlaciona con la concentración de CO₂ dentro del fruto y con el pH del mismo producto, en forma congruente con el efecto Pasteur. Por otro lado, la disolución de CO₂ en un medio acuoso da lugar a la formación de ácido carbónico, lo que provoca una disminución del pH dentro del sistema y este hecho puede aprovecharse para monitorear el comportamiento fisiológico del material envasado. En tal sentido, el presente trabajo se desarrolló con los siguientes objetivos e hipótesis:

1.1. Objetivos

General

Evaluar el comportamiento de un envase inteligente en modalidad de atmósfera modificada, basado en el uso de un sensor cromóforo de pH que evalúe el comportamiento fisiológico de un producto hortofrutícola y el adecuado funcionamiento del sistema, favorecer la reducción de pérdidas en postcosecha.

Específicos

- Desarrollar un sensor cromóforo basado en cambio de pH para monitorear el cambio de concentración de CO₂ en el espacio de cabeza de frutos de aguacate 'Hass'.
- Evaluar el comportamiento respiratorio de un fruto por medio de un sensor cromóforo basado en cambio de pH.

1.2. Hipótesis

- El uso de indicadores ácido-base constituye una opción viable para el desarrollo de un sensor cromóforo basado en el cambio de pH del espacio de cabeza de un producto hortofrutícola envasado en un sistema de atmósfera modificada.
- El uso de un sensor cromóforo puede diagnosticar la correcta operación de un sistema de atmósfera modificada.

1.3. Descripción general del trabajo

El documento de tesis está organizado en distintos capítulos. El Capítulo 2 muestra una revisión de literatura sobre el tema de las atmósferas modificadas y los envases inteligentes. En el Capítulo 3 se muestra el desarrollo de una biopelícula indicadora a base de carboximetilcelulosa con una mezcla de indicadores ácido-base: rojo de metilo (RM), azul de bromotimol (ABT) y azul de timol (AT). El Capítulo 4 se dedica al diseño de etiquetas multicapa, una con dos indicadores (RM, ABT) y otra con tres (RM, ABT, AT) para su uso como sensores cromóforos en el desarrollo de un envase inteligente de frutos de aguacate 'Hass'.

1.4. Literatura citada

- Boeckx, J., Pols, S., Hertog, M. L. A. T. M., & Nicolai, B. M. (2019). Regulation of the central carbon metabolism in apple fruit exposed to postharvest low-oxygen stress. *Frontiers in Plant Science*, 10, 472577. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.01384/XML/NLM>
- Chang, C. K., Cheng, K. C., Lin, S. H., Zhu, W. L., Tsai, S. Y., Adi, P., Santoso, S. P., & Hsieh, C. W. (2025). Improving the anaerobic respiration of persimmons (*Diospyros kaki* L.) caused by modified atmosphere packaging through pulsed electric fields: A sustainable technology for extending shelf-life of packaged-fruits. *Future Foods*, 11, 100534. <https://doi.org/10.1016/J.FUFO.2024.100534>
- Cukrov, D., Brizzolara, S., & Tonutti, P. (2019). Physiological and biochemical effects of controlled and modified atmospheres. *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*, 425–441. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813278-4.00021-X>
- Dirpan, A., Djalal, M., Rahman, R., & Genisa, J. (2021). The utilization of red cabbage extract (*Brassica oleracea*) in the production of avocado (*Persea americana* Mill) Freshness Indicator as Smart Packaging Element. *OnLine*

- Journal of Biological Sciences*, 21(3), 261–270.
<https://doi.org/10.3844/ojbsci.2021.261.270>
- Du, L., Huang, X., Li, Z., Qin, Z., Zhang, N., Zhai, X., Shi, J., Zhang, J., Shen, T., Zhang, R., & Wang, Y. (2025). Application of smart packaging in fruit and vegetable preservation: A review. *Foods*, 14(3), 447.
<https://doi.org/10.3390/FOODS14030447>
- Dwibedi, V., Kaur, G., George, N., Rana, P., Ge, Y., & Sun, T. (2024). Research progress in the preservation and packaging of fruits and vegetables: From traditional methods to innovative technologies. *Food Packaging and Shelf Life*, 46, 101385. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2024.101385>
- Ghidelli, C., & Pérez-Gago, M. B. (2018). Recent advances in modified atmosphere packaging and edible coatings to maintain quality of fresh-cut fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(4), 662–679. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1211087>
- Jia, H., Wu, C., Huang, M., & Zhu, Q. (2025). An intelligent fruit freshness monitoring system using hydrophobic indicator labels based on methylcellulose, k-carrageenan, and sodium tripolyphosphate, combined with deep learning. *International Journal of Biological Macromolecules*, 291, 140001. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.140001>
- Karaca, I. M., Haskaraca, G., Ayhan, Z., & Gültekin, E. (2023). Development of real time-pH sensitive intelligent indicators for monitoring chicken breast freshness/spoilage using real packaging practices. *Food Research International*, 173, 113261. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113261>
- Kuswandi, B., Wicaksono, Y., Jayus, Abdullah, A., Heng, L. Y., & Ahmad, M. (2011). Smart packaging: sensors for monitoring of food quality and safety. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 5(3–4), 137–146. <https://doi.org/10.1007/s11694-011-9120-x>
- Lin, Y., Ma, J., Sun, D. W., Cheng, J. H., & Wang, Q. (2023). A pH-responsive colourimetric sensor array based on machine learning for real-time monitoring of beef freshness. *Food Control*, 150, 109729. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2023.109729>
- Mahajan, P. V., & Lee, D. S. (2023). Modified atmosphere and moisture condensation in packaged fresh produce: Scientific efforts and commercial success. *Postharvest Biology and Technology*, 198, 112235. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2022.112235>
- Obaidi, A. Al, Karaca, I. M., Ayhan, Z., Haskaraca, G., & Gultekin, E. (2022). Fabrication and validation of CO₂-sensitive indicator to monitor the freshness of poultry meat. *Food Packaging and Shelf Life*, 34, 100930. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100930>
- Rashvand, M., Matera, A., Altieri, G., Genovese, F., Fadji, T., Linus Opara, U., Mohamadifar, M. A., Feyissa, A. H., & Carlo Di Renzo, G. (2023). Recent advances in the potential of modeling and simulation to assess the

- performance of modified atmosphere packaging (MAP) systems for the fresh agricultural product: Challenges and development. *Trends in Food Science & Technology*, 136, 48–63. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2023.04.012>
- Saltveit, M. E. (2020). Biological basis for CA and MA. In *Controlled and Modified Atmospheres for Fresh and Fresh-Cut Produce* (pp. 3–22). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804599-2.00002-8>
- Valle-Guadarrama, S., Morales-Cabrera, M., Peña-Valdivia, C. B., Mora-Rodríguez, B., Alia-Tejacal, I., Corrales-García, J., & Gómez-Cruz, A. (2013). Oxidative/fermentative behavior in the flesh of “Hass” avocado fruits under natural and controlled atmosphere conditions. *Food and Bioprocess Technology*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0747-8>
- Wang, C., Yusufu, D., & Mills, A. (2019). A smart adhesive “consume within” (CW) indicator for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 22, 100395. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2019.100395>

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Historia y origen del aguacate

El aguacate (*Persea americana* Mill.) es originario de Centroamérica y el sur de México. Con base en la evidencia arqueológica encontrada en Tehuacán (Puebla, México), se cree que apareció hace aproximadamente 12000 años. En esta región se puede encontrar el acervo genético natural, que puede ser útil para la mejora biotecnológica de la especie. Como evidencia de esta teoría, se han encontrado árboles primitivos de aguacate en la 'Sierra Madre Oriental' a lo largo del estado de Nuevo León (México) hasta Costa Rica. Desde esta región el aguacate se dispersó hacia la parte sureste de los Estados Unidos, las Antillas, hasta una gran parte de América del Sur (Colombia, Venezuela, Brasil, Ecuador, Perú, Bolivia y Chile). Las primeras evidencias del consumo de aguacate se remontan al 8000-7000 a.C., y se cree que esta fruta comenzó a cultivarse para el consumo humano hace al menos 5000 años y sigue siendo una parte esencial de la dieta de muchas de las comunidades de América del Norte y Central donde se originó, por ejemplo, en México y Guatemala (Yahia, 2012, 2023).

2.2. Morfología y fisiología del aguacate

El fruto del aguacate es una baya que consta de una gran semilla central y un pericarpio, que es la suma de la piel (exocarpio), la porción comestible (mesocarpio) y la capa interna que rodea la semilla (endocarpio) (Hurtado-Fernández et al., 2018). El peso de la fruta varía de 75 g a 2.5 kg dependiendo del tipo y variedad. La forma del fruto puede ser redondo en forma de pera u ovalada y la piel del fruto puede variar en textura y color (Araújo et al., 2018; Yahia, 2023). El fruto del aguacate está formado por la pared del ovario o pericarpio, que encierra una o varias semillas y se diferencia en tres capas de tejidos: el exocarpio, mesocarpio y el endocarpio (**Figura 1**). La capa exterior es

el exocarpio, comúnmente llamado piel o corteza. La piel varía de flexible a leñosa, de lisa a rugosa y de color verde-amarillo, púrpura rojizo, púrpura o negro; puede ser muy delgado, como en los frutos de la raza mexicana, o grueso y casi leñoso, como en algunos frutos grandes de la raza guatemalteca. La capa intermedia, el mesocarpio, es carnosa y generalmente constituye la mayor parte del pericarpio. La pulpa de la fruta es de color amarillo verdoso a amarillo brillante cuando está madura y de consistencia mantecosa, pero las variedades inferiores pueden ser fibrosas. En algunos aguacates maduros blandos, el mesocarpio puede adherirse a la cubierta externa de la semilla cuando ésta se extrae del fruto, dando a la semilla una especie de apariencia escarchada. La capa interna es el endocarpio, puede ser delgado, a menudo no bien diferenciado del mesocarpio, a veces imperceptible (Yahia, 2023). El fruto del aguacate tiene una semilla grande, que constituye hasta el 10 al 25 % del peso del fruto. El fruto de diferentes cultivares de aguacate varía en contenido de humedad y aceite, desde menos del 5 % hasta más del 30 % de aceite (Yahia & Woolf, 2011). Existen numerosas variedades de aguacate alrededor del mundo, según el clima en el que crecen, con diferentes formas, sabores, texturas, colores y olores. Los tipos más conocidos y comercializados son las variedades 'Hass' y Fuerte (Araújo et al., 2018).



Figura 1. Morfología del fruto de aguacate.

2.3. Variedades del aguacate

El aguacate cuenta con más de 500 variedades identificadas, pero son muy pocas las que tienen valor comercial debido a diversos factores como el tiempo de producción, la calidad en términos de contenido de proteínas y grasas, problemas de resistencia a los daños durante el transporte. Entre las variedades presentan diferencias en forma, peso, tamaño y sabor, pero la diferencia más destacada es el color de la cascara durante la maduración (Araújo et al., 2018).

Botánicamente, el aguacate se clasifica en tres razas principales: mexicana (*Persea americana* var. *drymifolia*), guatemalteca (*Persea nubigena* var. *guatemalensis*) y antillano (*Persea americana* var. *americana*) (Araújo et al., 2018; Yahia, 2023). Estas razas se diferencian por sus características sensoriales, textura y color de la cascara, resistencia al frío, robustez durante la manipulación, maduración del fruto y contenido de aceite (Ford et al., 2023; Yahia, 2023).

El fruto de la raza mexicana es pequeño (75-300 g), con piel fina y lisa, en su mayor parte verde, que se vuelve verde brillante o negra cuando madura. Su pulpa, suele ser de color verde intenso cerca de la piel, tornándose amarillenta alrededor de la semilla y con un contenido en aceite muy elevado, hasta el 30 % del peso en fresco (Yahia, 2023). Actualmente, las variedades comerciales se basan principalmente en los cultivares híbridos guatemaltecos y guatemalteco/mexicano, siendo el cultivar 'Hass' el más importante a nivel mundial; un híbrido guatemalteco/mexicano con frutos ovados o en forma de pera de piel gruesa y negra, pesa entre 140 y 300 g y representa el 95 % del volumen total vendido. Su popularidad se debe por su alto contenido de aceite, su sabor y su capacidad para soportar manipulación y transporte sin deteriorarse (Araújo et al., 2018; Yahia, 2023).

2.4. Índice de madurez y maduración del aguacate

La maduración de la fruta es un proceso irreversible altamente regulado que implica cambios bioquímicos y fisiológicos complejos y altamente coordinados. Según su modo de maduración, las frutas se clasifican como climatéricas y no climatéricas. Las frutas climatéricas se caracterizan por un aumento climatérico de la tasa de respiración y producción de etileno durante la maduración (Padmanabhan & Paliyath, 2019).

El aguacate es un fruto climatérico cuya maduración no ocurre mientras esta adherida al árbol sino solo después de la cosecha debido a un inhibidor cuya naturaleza se desconoce. Además, pueden permanecer en el árbol durante 3 semanas a pocos meses tras alcanzar la madurez fisiológica y antes de que ocurra una abscisión excesiva y el deterioro de la fruta (Araújo et al., 2018; Cowan & Wolstenholme, 2016; Yahia, 2023). La cosecha en una etapa inmadura no madurará adecuadamente y la piel se marchita. El contenido de aceite será bajo debido al bajo contenido de materia seca y tendrá fibras en la pulpa. Además, los aguacates se cosechan cuando alcanzan la madurez fisiológica con el fin de resistir las diversas prácticas de manejo postcosecha (Yahia, 2023).

Las normas internacionales exigen que la fruta cosechada cumpla con un nivel mínimo de madurez, por ello, el estándar mundial para determinar la madurez cosechable o la maduración del aguacate en el árbol se basa en el porcentaje de materia seca, que es recíproco al porcentaje de humedad y se ha demostrado que se correlaciona muy bien con la capacidad de maduración postcosecha del fruto (Araújo et al., 2018). En cultivares comerciales como Hass, el fruto debe presentar un mínimo de materia seca del 21 %. Para variedades como Fuerte, Pinkerton, Reed y Edranol, el porcentaje mínimo es del 20 %, mientras que para otras variedades es del 19 %, dependiendo también del cultivar y la región (Cowan & Wolstenholme, 2016; Yahia, 2023).

Una vez cosechado, generalmente maduran en un plazo de 5 a 20 d a temperaturas entre 15 y 24 °C (Cowan & Wolstenholme, 2016). La parte comestible adquiere una textura suave y mantecosa, la piel pierde parte de su brillo, volviéndose más opaca, la rojiza de la superficie aumenta y las variedades que se vuelven negras al madurar pueden volverlo parcialmente en el árbol. La cubierta de la semilla suele ser fina y marrón en lugar de carnosa y blanca. La resistencia de la fruta a la maduración generalmente se pierde en 1-2 d y madurará, aunque el tiempo de maduración se reducirá con el aumento del tiempo en el árbol y del almacenamiento (Yahia, 2023). Por ello, se ha demostrado que el preenfriamiento de la fruta a 5-6 °C inmediatamente después de la cosecha retrasa tanto la maduración como el ablandamiento de la fruta y reduce el aumento climatérico. Esta estrategia, permite mantener la calidad de la fruta durante el transporte y la exportación. Además, el proceso de maduración del aguacate también puede ser estimulada por la exposición al etileno, una hormona vegetal que desempeña un papel fundamental en el proceso de maduración. Este efecto puede inhibirse mediante el uso de antagonistas del etileno, como el 1-metilciclopropeno (1-MCP) (Cowan & Wolstenholme, 2016).

2.5. Efectos fisiológicos y bioquímicos de atmósferas modificadas

2.5.1. Almacenamiento en atmósfera modificada

La atmósfera modificada (AM) o controlada (AC) se refieren a sistemas en las que la composición de gases es diferente a la del aire. Frecuentemente, implica una reducción en los niveles de O₂ y/o un aumento en los niveles de CO₂. Por lo general, las atmósferas con 1-3 % de O₂ y 5 % de CO₂ se consideran óptimas para el almacenamiento de frutos. La diferencia de estos sistemas radica en el grado de precisión en el control de presiones parciales de O₂ y CO₂; la AC ofrece un control más exacto, ya que realizan mediciones periódicas de las concentraciones de gases y ajustes para mantenerlas al rango deseado (Saltveit, 2020), mientras que las atmósferas modificadas dependen de la respiración del producto y la permeabilidad de la película o del recipiente para mantener una atmósfera deseada (Mitcham et al., 2023).

El objetivo principal del almacenamiento de productos hortícolas perecederos en condiciones de AM es retrasar el proceso de maduración y senescencia, manteniendo al mismo tiempo los parámetros de calidad organoléptica, de manera que alargue la vida útil y comercial de los productos. Sin embargo, la decisión de utilizar el sistema de AM para el almacenamiento y/o envasado de productos depende de varios factores, de los cuales los más importantes son las respuestas fisiológicas y metabólicas específicas al estrés impuesto que, a su vez, determinan los resultados globales en términos de calidad del producto y aceptación del consumidor (Cukrov et al., 2019).

2.5.2. Efectos de la atmósfera modificada

Los beneficios o riesgos potenciales del uso de la AM varían según el producto, la variedad, la edad fisiológica, la composición atmosférica, la temperatura y la duración de la exposición (Saltveit, 2020). Es importante destacar que la reducción de la concentración de O_2 y el aumento de los niveles de CO_2 son eficaces para ralentizar el metabolismo general (Cukrov et al., 2019), lo que contribuye a retrasar la senescencia (maduración) y los cambios bioquímicos y fisiológicos asociados, como la reducción de la respiración, la producción de etileno, el ablandamiento y los cambios composicionales. También disminuye la sensibilidad de la fruta a la acción de etileno y alivia los trastornos fisiológicos, como lesiones por frío en el aguacate (Saltveit, 2020). Sin embargo, una reducción excesiva de la concentración de O_2 por debajo de los límites de tolerancia del producto provoca un metabolismo fermentativo (respiración anaeróbica) y la generación de compuestos como etanol y acetaldehído (Saltveit, 2020; Valle-Guadarrama et al., 2013) con el desarrollo de sabores y olores desagradables. Además, incrementa la susceptibilidad a la descomposición y a ciertos trastornos fisiológicos. Dicho cambio, se debe a que el glucólisis reemplaza el ciclo del ácido cítrico como la principal fuente de producción de energía (Saltveit, 2020).

2.5.3. Envasado en atmósfera modificada

La técnica de AM, también conocida como envasado en atmósfera modificada (EAM), utiliza películas poliméricas permeables para inducir cambios en la composición de la atmósfera que rodea al producto (Cukrov et al., 2019). Esta técnica consiste en envasar productos hortícolas frescos en bolsas y bandejas de plástico (Mahajan & Lee, 2023) creando y manteniendo una atmósfera modificada mediante la respiración del producto y la permeación de gas del envase (Kirtil et al., 2016). La mezcla específica de gases en el envase depende en cada caso del tipo de producto, los materiales de envasado y la temperatura de almacenamiento (Oliveira et al., 2015). Las atmósferas modificadas se pueden lograr de forma pasiva o activa. El EAM activo se basa en la inyección de las mezclas de gases preestablecidas en el paquete, mientras que el EAM pasivo depende principalmente del proceso natural de los productos y de la permeabilidad de la película lo que permite el equilibrio ideal de los gases (Rashvand et al., 2023).

Durante el almacenamiento, el producto recién cortado consume O_2 y produce CO_2 mediante la respiración del fruto, por lo que la concentración de O_2 y CO_2 dentro del envase se reduce y aumenta, respectivamente. El estado estacionario de equilibrio se alcanza cuando la cantidad de O_2 consumido y CO_2 producido dentro del paquete es igual a la cantidad de O_2 y CO_2 que penetra a través de la película (Ghidelli & Pérez-Gago, 2018). Por ello, la permeabilidad de la película al O_2 y CO_2 , junto con la respiración del producto y/o a las mezclas de gases aplicadas, deben contribuir a establecer una atmósfera modificada de equilibrio en el envase de manera que ralentiza el metabolismo y retrasa la senescencia (Cukrov et al., 2019; Oliveira et al., 2015), extendiendo así la vida útil del producto. Sin embargo, para mantener este equilibrio, hay que tener en cuenta una serie de parámetros, como la tasa de respiración y la masa del producto en cuestión, el espesor y la superficie de la película polimérica, las tasas de transmisión de gases a través de la película, el volumen libre inicial y la composición atmosférica dentro del envase, y factores ambientales externos

como la temperatura y la humedad relativa (Vakkalanka et al., 2012). Además, la exposición de los productos a niveles demasiado bajos de O_2 y concentraciones excesivas de CO_2 puede inducir la respiración anaeróbica, lo que resulta en la producción de metabolitos indeseables y otros trastornos fisiológicos. Por lo tanto, el rango de oxígeno y dióxido de carbono dentro del empaque debe determinarse específicamente para cada producto, el tipo de empaque y las condiciones de almacenamiento (Ghidelli & Pérez-Gago, 2018).

En caso del aguacate, las condiciones óptimas para almacenar el fruto en AM o AC son de 2-5 % de O_2 y 3-10 % de CO_2 , ya que estos rangos retrasan el ablandamiento y los cambios de color de la piel, así como la reducción de la respiración, las tasas de producción de etileno y el daño por frío de los frutos de aguacate. Sin embargo, los niveles de O_2 y CO_2 comúnmente recomendados y empleados por las compañías navieras y los proveedores de servicios AM/AC deben reconsiderarse y no usarse como niveles constantes y estáticos para todos los casos, como se hace comúnmente, sino que deben basarse en el tipo de fruta (cultivar), la etapa de madurez / maduración (contenido de materia seca), la distancia y la duración del envío, tipo de mercado de destino, temperatura y humedad relativa utilizadas, y otras condiciones (Yahia, 2023).

El aguacate 'Hass' verde maduro puede mantenerse a 5-7 °C en 2 % de O_2 y 3-5 % de CO_2 durante un periodo de 9 semanas, seguido de maduración al aire a 20°C para obtener una buena calidad. Además, se ha observado que niveles elevados de CO_2 , especialmente cuando el O_2 está por debajo del 1 %, incrementan la decoloración de la piel y la pulpa, así como el desarrollo de sabores indeseables (Yahia, 2012). En este sentido, el aguacate 'Hass' no tolera concentraciones de O_2 inferiores al 2 % sin que se inicie la fermentación. A su vez, a 20 °C, se ha demostrado que este metabolismo comienza cuando la concentración de O_2 es del 5 % o menor (Espinosa-Cruz et al., 2014). Vázquez-López et al., 2022, reportaron que el almacenamiento en atmósfera modificada de aguacate 'Hass' a 8 °C durante 32 d mantiene una buena calidad, ya que los

frutos conservan su firmeza y valores de ΔE en exocarpio y mesocarpio similares a los de la fruta fresca. A esta condición permite prologar la vida útil del aguacate durante un periodo dos veces mayor que a temperatura ambiente, al reducir los cambios de firmeza y color, que son parámetros críticos de calidad.

Debido a que la concentración de gases dentro del envase depende principalmente de la permeabilidad de la película y la tasa de respiración del producto, el uso de microperforaciones/macroperforaciones simples o múltiple es una técnica útil y económica para mejorar el intercambio de los gases (Yuan et al., 2021). Estas perforaciones son especialmente útiles en envases destinados a productos con altas tasas de respiración o que no toleran atmósferas con bajo nivel de O_2 . Por ello, se pueden incorporar microperforaciones (40-200 μm) o macroperforaciones (>200 μm) a un envase para facilitar el intercambio de gases. La producción de microperforaciones consiste en colocar agujeros microscópicos en la estructura del envase mediante el uso de láser o descargar electrostáticas, mientras que las macroperforaciones se producen a menudo utilizando agujas o punzones calientes o fríos (Brandenburg, 2020; Forney & Yaganza, 2011). Esto permite un intercambio de gases en tiempo real a una alta tasa entre los entornos interno y externo del envase, lo que evita la formación de condiciones anaeróbicas (Yuan et al., 2021). Las tasas de intercambio de oxígeno y dióxido de carbono a través de una perforación son aproximadamente 1:1 en contraste con las películas sólidas que tienen proporciones de 1:2 a 1:5 (Forney & Yaganza, 2011). Espinosa-Cruz et al., 2014, reportaron que el uso de microperforado de 200 μm , con 4 y 2 orificios, fue adecuado para manejar frutos de aguacate “Hass” a 18 °C y 5 °C, con concentraciones de O_2 de 3.5 % y 4,0 %, respectivamente.

2.5.4. Almacenamiento en condiciones de bajo O_2 y alto CO_2

La concentración de oxígeno en los tejidos de la fruta se basa principalmente en la tasa de respiración de cada cultivar, ya que la relación de O_2 y CO_2 fluctúa continuamente debido a las reacciones bioquímicas constantes y la degradación de los compuestos orgánicos. La exposición de los frutos a diferentes

concentraciones de atmósfera de oxígeno puede ser beneficioso o perjudicial dependiendo de varios factores (Ali et al., 2023).

En condiciones normales de nivel de oxígeno, las células producen energía en forma de ATP a través de la fosforilación oxidativa (Benkeblia, 2021). Sin embargo, la reducción de la disponibilidad de O₂ por debajo del 1-3 % o la falta total de O₂ conduce inicialmente a una reducción de la tasa de transporte de electrones y de la actividad del ciclo del ácido tricarboxílico a medida que se acumula NADH, y posteriormente una transición del metabolismo aeróbica al anaeróbica, que regenera NAD⁺ para que la glucólisis pueda seguir produciendo un suministro adecuado de ATP para mantener los procesos metabólicos esenciales (Saltveit, 2020).

A medida que disminuye el O₂ disponible, el piruvato, producto final de la glucólisis, puede comenzar a acumularse, ya que no hay suficiente O₂ para que el ciclo del ácido cítrico y la fosforilación oxidativa continúen oxidando todo el piruvato producido. Para evitar esta acumulación y regenerar el NAD⁺, el piruvato es convertido en ácido láctico por la enzima lactato deshidrogenasa (LDH), sin la liberación de CO₂. Sin embargo, esta reacción reduce el pH del citoplasma, inhibiendo la actividad de la LDH y activando la enzima piruvato descarboxilasa (PDC), que convierte el piruvato en acetaldehído con la liberación de dióxido de carbono y luego el acetaldehído se convierte en etanol por la alcohol deshidrogenasa (ADH) (Benkeblia, 2021; Saltveit, 2020). Por ello, la concentración de oxígeno no debe descender por debajo del nivel del punto de compensación anaeróbica (PCA), ya que éste marca la transición del metabolismo aeróbico al anaeróbico (Cukrov et al., 2019). De hecho, los efectos de la hipoxia/anoxia no dependen únicamente de la cantidad de oxígeno disponible para la producción de ATP, sino también del tiempo de exposición. Bajo anoxia prolongada, se encontró que el etanol era el producto final más abundante de la fermentación (Benkeblia, 2021). (Burdon et al., 2007), reportaron que un aumento de las actividades de PDC y ADH, resultó en una marcada

acumulación de metabolitos de fermentación en el aguacate 'Hass' bajo la atmósfera de almacenamiento con menos del 0.5 % de concentración de oxígeno. Asimismo, los aguacates 'Hass' mantenidos en 0.25 % de O₂ solo o en combinación con 80 % de CO₂ durante 3 d a 20 °C, tenían concentraciones más altas de acetaldehído y etanol (Yahia, 2012).

2.5.5. Efecto Pasteur

El objetivo del almacenamiento postcosecha de frutas es reducir los niveles de O₂ a tal grado que el metabolismo respiratorio se reduzca lo máximo posible, pero sin inducir demasiados efectos negativos en la calidad de la fruta. Uno de estos efectos negativos es la inducción de la fermentación (Boeckx, Hertog, et al., 2019). Cuando el estrés por bajo nivel de O₂ inducido en el tejido es demasiado severo, la respiración mitocondrial se ve demasiado comprometida, lo que lleva a un suministro insuficiente de ATP para los procesos que demandan energía debido por la baja eficiencia de la fermentación, que sólo genera 2 ATPs por molécula de glucosa en comparación con los 38 ATPs que se produce en condiciones aeróbicas. En un intento por compensar esta disminución en la producción de energía respiratoria, las plantas aumentan su flujo glucolítico entre 5 a 9 veces para producir más energía con la conversión de glucosa a piruvato, un proceso conocido como el efecto Pasteur (Boeckx, Pols, et al., 2019; Saltveit, 2020). Sin embargo, la respiración anaeróbica o fermentación da lugar a la formación de ácido láctico por la actividad de la LDH. Un mayor nivel de ácido láctico disminuye el pH intracelular y activa la PDC al tiempo que inactiva la LDH. Entonces, el piruvato ya no se oxida, sino que se descarboxila para formar acetaldehído, CO₂ y etanol (Boeckx, Hertog, et al., 2019; Saltveit, 2020).

2.6. Envases inteligentes (*smart packaging*)

El ámbito de los envases inteligentes es muy amplio y abarca tanto los envases activos como los envases inteligentes (*intelligent packaging*), que controlan y responden a los cambios externos e internos que se producen en un producto. Además de las funciones tradicionales de los envases como la protección, la

contención, la comodidad y la comercialización, los envases inteligentes también se caracterizan por sus funciones activas emergentes, que permiten a los envases desempeñar un papel vital durante el almacenamiento y la transformación de los alimentos. Un sistema de envasado inteligente puede detectar, informar, reaccionar y reducir los cambios internos y externos no deseados que se producen en los productos alimentarios. Por ello, el envasado inteligente puede considerarse un paquete completo que ofrece todas las soluciones para el envasado de alimentos que detecta y supervisa los cambios que se producen en el producto y su entorno (envasado inteligente), además de responder a estos cambios (envasado activo). Según sus características funcionales, los envases inteligentes pueden clasificarse en dos categorías: envases activos y envases inteligentes (Sarma et al., 2023).

2.6.1. Envase inteligente (*intelligent packaging*)

El envase inteligente es aquel que puede encenderse o apagarse en respuesta a cambios en las condiciones internas y externas del sistema y comunica el estado del producto a los clientes o usuarios finales. Este tipo de envase monitorea la calidad de los alimentos envasados durante el transporte y la distribución mediante diversos mecanismos, proporcionando información a través de señales que facilita la toma de decisiones (Akhila et al., 2024; Kuswandi et al., 2011).

Las funciones del envasado inteligente incluyen el monitoreo, la detección, el registro, el seguimiento y la comunicación (Caicedo-Perea et al., 2022; Heo & Lim, 2024; Kuswandi, 2022) de los cambios en el entorno de los productos y esta información se presenta al consumidor de una manera que los envases estándar no pueden (Aniruddha Prabhu et al., 2024). Para realizar estas funciones, los envases inteligentes utilizan tres sistemas o dispositivos principales: los indicadores, sensores y portadores de datos (George et al., 2023; Heo & Lim, 2024; Kuswandi, 2022). Los indicadores y sensores utilizan mecanismos específicos que detectan cualquier alteración del alimento para garantizar la

seguridad y calidad por causa de procesos fisiológicos, químicos y biológicos que podrían estar relacionados con cambios de pH, actividad del agua, concentración de gases y cambios de temperatura, mientras que los portadores de datos como los códigos de barras y las etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID), almacenan información sobre las etapas de producción, procesamiento y distribución del producto, permitiendo a los usuarios acceder a esta información escaneándola (Caicedo-Perea et al., 2022; Heo & Lim, 2024).

2.6.2. Indicadores

Los indicadores son dispositivos o herramientas que proporcionan información cualitativa o semicuantitativa a través de un cambio visual sobre las alteraciones que se producen en el alimento o su entorno, como alteraciones del pH, la temperatura, el tiempo, etc., (George et al., 2023; Qiao et al., 2024). Su función principal es la de provocar un cambio de color que indique la presencia, ausencia o concentración de un analito o la reacción entre dos o más analitos (George et al., 2023). Por lo tanto, el indicador se utiliza para reflejar visualmente la calidad de los alimentos o las condiciones ambientales; es decir, proporciona información y advertencias visuales en tiempo real sobre la calidad o la vida útil restante del producto. (Qiao et al., 2024). Los indicadores se pueden clasificar según el tipo de variable que controla como indicadores de frescura, indicadores de tiempo-temperatura e indicadores de gas (Drago et al., 2020).

2.6.3. Indicadores de frescura

Los indicadores de frescura son dispositivos colorimétricos que se incorporan dentro del envase del alimento para monitorear la calidad y la frescura de los alimentos durante su almacenamiento y transporte (Drago et al., 2020; George et al., 2023; Kuswandi, 2022). Estos dispositivos están compuestos principalmente por un colorante sensible al pH y un sustrato formador de película que actúa como un soporte (B. Chen et al., 2023). El principio general de funcionamiento del indicador de frescura es el siguiente: la concentración de metabolitos generados como resultado del deterioro de los alimentos aumenta con el tiempo y los

metabolitos liberados se acumulan en el espacio de cabeza del envase. El indicador de frescura producido para la detección de un metabolito de deterioro específico cambia de color mediante una reacción entre el colorante presente en su estructura y el metabolito objetivo acumulado en el espacio de cabeza (Karaca et al., 2023). El empleo de estos dispositivos se centra en la monitorización de la frescura de productos alimenticios, tales como la carne, los mariscos, así como las frutas y verduras, ya que estos productos generan una gran cantidad de compuestos volátiles (CO_2 , etanol, ácidos orgánicos, compuestos de nitrógeno volátiles, aminas biogénicas, compuestos sulfúricos) durante la maduración o deterioro que pueden usarse para indicar la madurez o la calidad del producto (Kuswandi, 2022).

Por ello, el cambio de color de los indicadores de frescura depende el tipo de alimento. En el caso de los productos cárnicos, como la carne y el pescado tiene alto contenido de proteínas y vitaminas y al descomponerse mediante la interacción de las enzimas y microorganismos, liberan aminas volátiles alcalinas. Esta reacción química eleva el pH del espacio de cabeza del envase. Por ello, monitorizar el valor de pH puede revelar información sobre la descomposición del alimento y, en consecuencia, su frescura. Por el contrario, las frutas y verduras emiten continuamente dióxido de carbono y ácidos orgánicos volátiles durante su proceso natural de descomposición. Esta emisión continua puede provocar una disminución del pH del entorno del envase, lo que indica un deterioro de la calidad con el paso del tiempo (Ehtesabi & Afkaneh, 2025).

2.6.4. Materiales utilizados para el desarrollo de etiquetas inteligentes colorimétricos

2.6.4.1. Materiales a base de biopolímeros

En general, los indicadores colorimétricos de pH se componen de dos elementos principales: un soporte sólido y un colorante sensible a las variaciones de pH, que puede ser de origen natural o sintético (B. Chen et al., 2023; Fan et al., 2024; D. Liu et al., 2021; Rong et al., 2023). La función principal del soporte sólido

consiste en inmovilizar los colorantes empleados en su interior (Abolghasemi et al., 2016; Rong et al., 2023; Shaik et al., 2022). Estos soportes pueden ser polímeros sintéticos y naturales, así como sustratos a base de papel (Ehtesabi & Afkaneh, 2025; Hailu et al., 2025). Para garantizar la estabilidad, selectividad y sensibilidad de las etiquetas indicadoras (Abolghasemi et al., 2016), es fundamental seleccionar un polímero adecuado que funcione como una matriz sólida y robusta, junto con un colorante apropiado que mejore la funcionalidad y la apariencia de las etiquetas. Además, la selección de los materiales debe considerar los requerimientos del envasado, para garantizar la durabilidad, la flexibilidad y la estabilidad frente a las influencias ambientales (Ehtesabi & Afkaneh, 2025).

Los polímeros sintéticos se emplean con frecuencia como sustratos sólidos para la elaboración de indicadores colorimétricos, ya que poseen cualidades físicas, químicas y mecánicas superiores, que los convierte en materiales de construcción altamente adaptables que actúan como barrera contra la degradación microbiológica y fisicoquímica, así como contra los efectos del medio ambiente. Sin embargo, la acumulación de residuos no biodegradables derivados de los plásticos a partir de derivados del petróleo ha generado importantes preocupaciones en el medio ambiente a escala mundial, principalmente atribuidas al uso excesivo de polímeros sintéticos (Hailu et al., 2025). En este contexto, los biopolímeros son candidatos potenciales debido a su biodegradabilidad, sostenibilidad, facilidad de preparación, compatibilidad, bajo costo (Kumar et al., 2024; Xiong et al., 2024) y su comportamiento sensible a pH. Además, estos materiales exhiben una capacidad para unirse rápidamente a los gases volátiles y facilitar la liberación de los pigmentos (Ehtesabi & Afkaneh, 2025). Entre los biopolímeros más destacados que se utilizan para la elaboración de indicadores de colorimétricos se encuentran los polisacáridos (quitano, almidón, agar, agarrosa, carragenina, derivados de celulosa, alginato de sodio, etc.), las proteínas (gelatina, proteínas vegetales), y los poliésteres alifáticos

(poliácido láctico) (Ehtesabi & Afkaneh, 2025; Fan et al., 2024; Hailu et al., 2025; Kumar et al., 2024).

La celulosa y sus derivados han despertado un gran interés como materiales de envasado para su aplicación en películas inteligentes. Entre ellos se destacan la carboximetilcelulosa (CMC), la metilcelulosa (MC), la etilcelulosa (EC), la Hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC) y la nanocelulosa (NC) (Yekta et al., 2023). La carboximetilcelulosa es un éter de celulosa lineal que se obtiene mediante el proceso de carboximetilación, que consiste en la sustitución de ciertos grupos hidroxilos de la molécula de celulosa por grupos carboximetilo. Este proceso otorga a la celulosa propiedades hidrofílicas y capacidad de interacción entre cargas positivas y negativas. Por lo tanto, la CMC es soluble en agua (Kaewprachu et al., 2024; D. Liu et al., 2021; Yildirim-Yalcin et al., 2022). La CMC es ampliamente utilizada en aplicaciones alimentarias debido a sus propiedades espesantes, gelificantes, estabilizadoras y emulsionantes, así como a la disponibilidad, biocompatibilidad, no toxicidad y bajo costo (Yekta et al., 2023; Yildirim-Yalcin et al., 2022). Este biopolímero posee una capacidad filmógena, es decir, que puede formar una película. Además, es semiflexible, transparente, aniónico y sensible a pH, es decir, que su estructura puede cambiar en función de la acidez o basicidad e interactuar con otras moléculas en el medio acuoso. Por ello, al reducir el pH de los entornos acuosos, se reduce aún más la densidad de carga de la cadena de CMC, con un pKa aproximado de 4.4. Por lo tanto, se puede utilizar para el transporte (soporte) de los colorantes de pH, que son componentes esenciales de las películas de sensores colorimétricos (Kaewprachu et al., 2024; Panwar et al., 2024). No obstante, el empleo de CMC en indicadores colorimétricos exhibe propiedades mecánicas limitadas y una resistencia al agua reducida. Con el fin de optimizar estas propiedades, se puede combinar con otros tipos de matrices, así como el empleo de plastificantes para mejorar las propiedades mecánicas y el paso de gases a través de las películas (Fan et al., 2024; Kumar et al., 2024). El plastificante es un tipo de compuesto no volátil con un peso molecular bajo que se añade a un material para aumentar su

flexibilidad, procesabilidad o hinchabilidad. Los plastificantes comúnmente utilizados incluyen glicerol, sorbitol, PEG 400/600 (Fan et al., 2024).

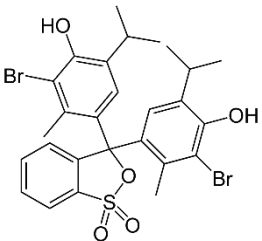
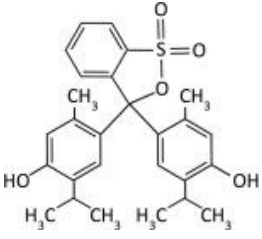
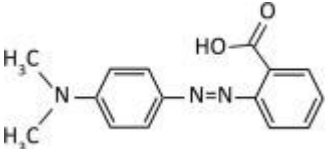
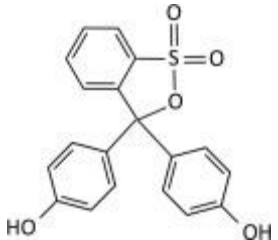
2.6.4.2. Colorantes

Para el desarrollo de los indicadores de frescura o etiquetas inteligentes se han utilizado diversos colorantes debido a sus propiedades cromogénicas, ya sean de origen natural o sintético (Luo et al., 2022). Sin embargo, la selección del colorante a utilizar en el desarrollo de los indicadores de frescura debe realizarse en función de las propiedades químicas del metabolito objetivo, ya sea ácido o básico y la estabilidad de éste (Karaca et al., 2023). Los colorantes sintéticos o indicadores ácido-base como el azul de bromotimol, azul de timol, azul de bromofenol, púrpura de bromocresol, rojo de metilo, rojo de fenol y verde de bromocresol son los más empleados para la elaboración de indicadores de frescura de los alimentos, ya que cambian de color en respuesta a las variaciones de pH. Su popularidad se debe a sus pronunciadas transiciones de color y a su estabilidad frente a cambios de pH (H. Chen et al., 2018, 2019; Jia et al., 2025; Obaidi et al., 2022; Panwar et al., 2024; Rong et al., 2023; Rukchon et al., 2014; Wang et al., 2019; Y. Zhang & Lim, 2018). Algunos de los indicadores más utilizados se muestran en el **Cuadro 1**, como el azul de bromotimol presenta un cambio de color de amarillo a azul en un rango de pH de 6 a 7.6, mientras que el rojo de metilo exhibe un cambio de color de rojo a amarillo en un rango de pH de 4.2 a 6.2.

Estos cambios de colores se le atribuyen al efecto de resonancia, ocasionado por la protonación o desprotonación de los grupos funcionales, como resultado de la interacción entre los compuestos ácidos o alcalinos, generados a partir de los cambios fisiológicos y bioquímicos durante la maduración o el deterioro de los productos alimentarios (Hailu et al., 2025; Liu et al., 2022; Luo et al., 2022). En el caso del rojo de metilo, contiene un grupo azoico ($-N=N-$) sensible al pH, lo que hace que cambien de color, ya que su par solitario de electrones en el nitrógeno del grupo dimetilamina se protona en un entorno ácido, formando un ión

dimetilamonio ($-\text{NH}(\text{CH}_3)_2^+$). Esta protonación aumenta la densidad electrónica en el grupo azo y en el anillo aromático al que está unido, alterando la distribución electrónica y modifica el espectro de absorción, lo que provoca que la molécula adquiera un color rojo. En tanto, en un entorno básico, el grupo ácido carboxílico pierde un protón, formando carboxilato ($-\text{COO}^-$). Esta desprotonación disminuye la densidad electrónica del grupo azo y del anillo aromático, modificando la estructura electrónica y el espectro de absorción de la molécula, lo que produce un color amarillo (**Figura 2**) (Yadav et al., 2024).

Cuadro 1. Algunos indicadores ácido-base sensibles a pH y sus propiedades, adaptado a (Zhang & Lim, 2018).

<i>Indicadores ácido-base</i>	<i>Estructura</i>	<i>Rango de pH</i>	<i>pKa</i>	<i>Color</i>
<i>Azul de bromotimol</i>		6.0 – 7.6	7.0	Amarillo-Azul
<i>Azul de timol</i>		8.0 - 9.2	8.9	Amarillo-Azul
<i>Rojo de metilo</i>		4.2 – 6.2	4.95	Rojo-Amarillo
<i>Rojo fenol</i>		6.4 – 8.0	7.4	Amarillo-Rojo

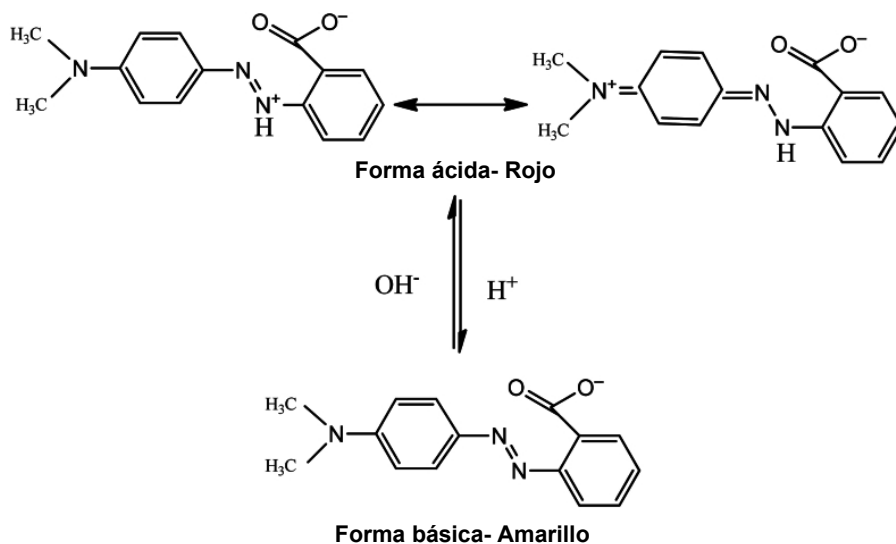


Figura 2. Cambios de color del rojo de metilo en sus formas ácidas y básicas (Yadav et al., 2024).

Como se mencionó anteriormente, el cambio de color de los indicadores ácido-base depende del tipo de metabolito objetivo a detectar y la naturaleza del alimento. Para que el indicador cambie de color y sea sensible al pH, es necesario ajustar previamente el pH del indicador hacia un entorno ácido o alcalino, según el compuesto de interés. Para la detección de compuestos ácidos, tales como el CO_2 , es necesario alcalinizar el medio, de tal manera que, al disolverse el CO_2 en los colorantes, se forme ácido carbónico, lo que va a provocar una disminución del pH y, en consecuencia, un cambio de color en el indicador (Y. Zhang & Lim, 2018). Un aspecto fundamental en este proceso es considerar el valor de pKa del ácido carbónico (6.35), ya que constituye un parámetro clave para la selección de indicadores. Por lo tanto, deben elegirse aquellos colorantes cuyo pKa sea superior al del ácido carbónico para que puedan reaccionar de manera sensible a la presencia de CO_2 . En este contexto, los indicadores como el azul de bromotimol, el azul de timol y el rojo de fenol cumplen con esta condición al presentar pKa superiores al de ácido carbónico, lo que los convierte en opciones adecuadas para la detección de este gas (Obaidi et al., 2022; Y. Zhang & Lim, 2018). De manera similar, para la detección de compuestos alcalinos, es necesario acidificar previamente el medio, de modo que los indicadores sean capaces de reaccionar con los metabolitos básicos generados durante el

deterioro de los alimentos. Entre los metabolitos alcalinos, se encuentra los nitrógenos volátiles totales (TVB-N, por sus siglas en inglés) principalmente el amoníaco, la dimetilamina y la trimetilamina, que son productos característicos del deterioro de la carne y de otros productos de origen animal (Karaca et al., 2023; Obaidi et al., 2022; Rukchon et al., 2014; Y. Zhang & Lim, 2018).

Por otra parte, los indicadores ácido-base utilizados en los sensores colorimétricos puede ser empleado de manera individual o en combinación de dos o más colorantes. El empleo un solo indicador puede presentar ciertas limitaciones, dado que su rango de respuesta al pH y su espectro de cambio de color suelen ser limitados y, en ocasiones, no satisfacen las necesidades del monitoreo en varias frutas en diferentes etapas de madurez (Jia et al., 2025), ya que el cambio de color puede ocurrir de manera muy rápida, lo que dificultaría la interpretación visual (Panwar et al., 2024). A pesar de las limitaciones asociadas, diversos estudios previos han utilizado un solo indicador basada en azul de bromotimol para monitorear la frescura de papaya reciente cortada (Rong et al., 2023). En otros estudios, se ha empleado el rojo de metilo como indicador para la detección de la emisión de aldehídos en diversos frutos, tales como el kiwi (Shao et al., 2022), la manzana (Kim et al., 2018) y el monitoreo de la frescura de la fruta de dragón (Warsiki & Rofifah, 2018). Además, se ha empleado el azul de bromofenol para monitorear la frescura de mango (Dirpan et al., 2018) y guayaba (Kuswandi et al., 2013).

Para superar esta limitación, se ha recurrido al uso de indicadores mixtos, compuestos por dos o más colorantes como una estrategia eficaz para ampliar el rango de cambios de color y responder a una variación de pH más amplia (Jia et al., 2025; D. ; Liu et al., 2022). Este enfoque proporciona una mayor precisión y distinción visual (Panwar et al., 2024), aunque su rendimiento depende de las propiedades a cada indicador, así como la selección adecuada de los colorantes y sus proporciones (Jia et al., 2025). En aplicaciones prácticas, los indicadores mixtos han demostrado su eficacia en el monitoreo de la frescura de los

alimentos. En investigaciones previas, se han elaborado indicadores colorimétricos en forma de etiquetas mediante la combinación de rojo de metilo y azul de bromotimol para detectar variaciones en los niveles de CO₂ en frutas y verduras (Tang et al., 2025), para indicar la frescura del pimiento verde recién cortado (H. Chen et al., 2018; Feng et al., 2023) y para detectar compuestos volátiles azufrados durante la maduración de durian (Niponsak et al., 2016). Otros investigadores han desarrollado una etiqueta indicadora basada en rojo de metilo y verde de bromocresol para indicar la frescura de frutas como mango, kiwi y uva (Jia et al., 2025).

También existen diversos estudios que abordan el desarrollo de indicadores de frescura mediante el uso de colorantes naturales como las antocianinas, curcumina, betalaínas, carotenoides, clorofilas, brasilina, quercetina, entre otros. Los colorantes naturales han sido empleados por sus propiedades cromogénicas, debido a las transiciones colorimétricas por diversos factores. Dichos factores, incluyen cambios en las propiedades de los alimentos como el pH, la presencia de metabolitos volátiles en descomposición o factores externos como la temperatura, radiación UV y humedad. Sin embargo, aún presenta diversos desafíos debido a su inestabilidad en condiciones ambientales cambiantes y su bajo potencial de aplicación industrial (Obaidi et al., 2022).

2.6.4.3. Materiales para capas externa e interna en etiquetas indicadoras

En los últimos años, la tendencia en los indicadores de frescura sensibles a pH y a los gases van en aumento. Sin embargo, la seguridad de los envases ha traído mucha atención. Al respecto, la Agencia Europea de Seguridad Alimentaria (AESa) ha expresado su preocupación por la seguridad alimentaria, ya que estos dispositivos se integran dentro del envase y pueden generar riesgos de migración de los materiales utilizados en su fabricación, principalmente los colorantes químicos, metales pesados y adhesivos de la película, lo que limita la aplicación comercial de los indicadores de frescura (Shao et al., 2021; Zhai et al., 2025). Asimismo, el uso de biopolímeros hidrofílicos para desarrollar películas

indicadoras presenta alta polaridad e índice de hinchamiento, lo que puede favorecer la lixiviación en entornos de alta humedad, ocasionando señales falsas positivas o lecturas inexactas, además de la migración del colorante desde el interior de la superficie de la película hacia el entorno del envasado. Para reducir estos problemas y mejorar la seguridad, se ha implementado diversas técnicas como el uso de matrices de biopolímeros hidrofóbicos, ensamblaje capa por capa o mezclas de biopolímeros (Panwar et al., 2024). En este sentido, se han desarrollado indicadores de frescura, en forma de etiquetas que constan de tres capas: una capa interna semipermeable para controlar la difusión de los metabolitos; una capa intermedia que contiene el indicador responsable del cambio de color; y una capa externa protectora (Cheng et al., 2022; K. Lee, Park, et al., 2019). La capa interna constituye un elemento crítico para asegurar el rendimiento y la seguridad del indicador, ya que permite el paso del metabolito objetivo generado por el deterioro del producto y al mismo tiempo evita la migración de los colorantes (K. Lee, Baek, et al., 2019; K. Lee, Park, et al., 2019).

En este contexto, entre las películas permeables o semipermeables más utilizadas en la elaboración de indicadores de frescura se destacan el polietileno de grado alimenticio (PE), donde la película indicadora y el papel de filtro (como fondo) se envolvieron con una película adhesiva de PE de calidad alimentaria (H. Chen et al., 2018); el polietileno de tereftalato (PET) como capa externa y el politetrafluoroetileno (PTFE) como membrana hidrofóbica permeable a gases, que además protege al indicador de la humedad (E. J. Lee & Shin, 2019); y películas internas de poli(éter-bloque-amida) (PEBA), junto con capas de colorantes inmovilizados y películas externas de PET (K. Lee, Park, et al., 2019). También se ha empleado lámina Tyvek®, de alta permeabilidad a gases y vapores como capa interna, en combinación con una capa de cambio de color inmovilizada con verde de bromocresol y el polímero aglutinante, y una capa externa de polietileno de baja densidad (LDPE) (K. Lee, Baek, et al., 2019). Además, se han desarrollado indicadores de frescura donde el PET con el colorante se laminó con una película de LDPE de color blanco como capa interna,

con el fin de que refleje bien el cambio de color (Al Obaidi et al., 2024; Karaca et al., 2023; Obaidi et al., 2022). Estas capas colorimétricas suelen prepararse previamente mediante métodos de recubrimiento, impregnación o laminación utilizando uno o más colorantes de diversos materiales, incluidos polímeros a base de celulosa, papel de filtro o polímeros superabsorbentes (Cheng et al., 2022). Las capas protectoras suelen crearse a partir muchos polímeros incluyendo las películas de LDPE o PET. Sin embargo, la formación de estructuras multicapa incrementa la complejidad y los costos de la producción en masa. Por lo tanto, se requiere seleccionar cuidadosamente los materiales, dependiendo el metabolito objetivo y considerar la seguridad (Cheng et al., 2022).

En este sentido, la lámina de poliolefina hilada (Tyvek®) como capa interna de los indicadores de frescura, se considera una opción prometedora, ya que es una lámina no tejida hecha de polietileno de baja densidad (LDPE) y es ampliamente utilizada para empaques industriales, en envoltura de edificios y ropas de protección. Además, Tyvek exhibe una mayor relación resistencia-peso que el papel y ofrece una excelente resistencia al agua, al tiempo que mantiene la permeabilidad al aire y al vapor. Por lo tanto, se espera que tanto los metabolitos gaseosos como los de vapor que se generen a partir de los productos alimenticios puedan penetrar libremente a través de la lámina porosa de Tyvek, reaccionar con el colorante indicador y provocar un cambio de color, que es representativo de la calidad de los alimentos envasados. Además, se espera que la lámina opaca de Tyvek no solo evite la migración del colorante de la capa que cambia de color al producto alimenticio, sino que también sirva como fondo blanco para el reconocimiento efectivo del cambio de color (K. Lee, Baek, et al., 2019).

2.7. Literatura citada

Abolghasemi, M. M., Sobhi, M., & Piryaee, M. (2016). Preparation of a novel green optical pH sensor based on immobilization of red grape extract on bioorganic agarose membrane. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 224, 391–395. <https://doi.org/10.1016/J.SNB.2015.10.038>

- Akhila, K., Singh, S., & Gaikwad, K. K. (2024). New smart packaging technologies for monitoring quality of agriculture produce. In *Novel Packaging Systems for Fruits and Vegetables* (pp. 195–218). Apple Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003415701>
- Ali, M., Batool, S., Khalid, N., Manzoor, M. F., Zhao, X., Li, X., Li, F., Xinhua, Z., & Aadil, R. M. (2023). Alcoholic off-flavor disorders in fresh fruits. *Journal of Food Biochemistry*, 2023, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2023/3959653>
- Al Obaidi, A., Haskaraca, G., Ayhan, Z., & Gultekin, E. (2024). Simulation and validation of a novel colorimetric three-layer intelligent indicators with different binders to monitor freshness of atlantic bonito (*Sarda sarda*) under two different atmospheres. *Packaging Technology and Science*, 37(12), 1131–1144. <https://doi.org/10.1002/PTS.2849>
- Aniruddha Prabhu, B. P., Dani, R., Abdullah, K. H., Sharma, T., Bhatt, C., & Chauhan, R. (2024). A Comprehensive review of sensor-based smart packaging technology. In V., Shrivastava, J. C., Bansal, & Panigrahi B. K. (Eds.), *Power Engineering and Intelligent Systems* (Vol. 1, pp. 39–52). 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7216-6_4
- Araújo, R. G., Rodriguez-Jasso, R. M., Ruiz, H. A., Pintado, M. M. E., & Aguilar, C. N. (2018). Avocado by-products: Nutritional and functional properties. *Trends in Food Science & Technology*, 80, 51–60. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2018.07.027>
- Benkeblia, N. (2021). Physiological and biochemical response of tropical fruits to hypoxia/anoxia. *Frontiers in Plant Science*, 12, 670803. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2021.670803/BIBTEX>
- Boeckx, J., Hertog, M., Geeraerd, A., & Nicolai, B. (2019). Regulation of the fermentative metabolism in apple fruit exposed to low-oxygen stress reveals a high flexibility. *Postharvest Biology and Technology*, 149, 118–128. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2018.11.017>
- Boeckx, J., Pols, S., Hertog, M. L. A. T. M., & Nicolai, B. M. (2019). Regulation of the central carbon metabolism in apple fruit exposed to postharvest low-oxygen stress. *Frontiers in Plant Science*, 10, 472577. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2019.01384/XML/NLM>
- Brandenburg, J. S. (2020). Packaging design: Functions and materials. *Controlled and Modified Atmospheres for Fresh and Fresh-Cut Produce*, 185–210. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804599-2.00011-9>
- Burdon, J., Lallu, N., Yearsley, C., Burmeister, D., & Billing, D. (2007). The kinetics of acetaldehyde and ethanol accumulation in ‘Hass’ avocado fruit during induction and recovery from low oxygen and high carbon dioxide conditions. *Postharvest Biology and Technology*, 43(2), 207–214. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2006.08.014>

- Caicedo-Perea, C., Solis-Molina, M., & Jiménez-Rosero, H. (2022). Empaques inteligentes: definiciones, tipologías y aplicaciones. *Informador Técnico*, 86(2). <https://doi.org/10.23850/22565035.3985>
- Chen, B., Zhang, M., Chen, H., Mujumdar, A. S., & Guo, Z. (2023). Progress in smart labels for rapid quality detection of fruit and vegetables: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 198, 112261. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2023.112261>
- Chen, H., Zhang, M., Bhandari, B., & Guo, Z. (2018). Applicability of a colorimetric indicator label for monitoring freshness of fresh-cut green bell pepper. *Postharvest Biology and Technology*, 140, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.02.011>
- Chen, H., Zhang, M., Bhandari, B., & Yang, C. (2019). Development of a novel colorimetric food package label for monitoring lean pork freshness. *LWT*, 99, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.048>
- Cheng, H., Xu, H., Julian McClements, D., Chen, L., Jiao, A., Tian, Y., Miao, M., & Jin, Z. (2022). Recent advances in intelligent food packaging materials: Principles, preparation and applications. *Food Chemistry*, 375, 131738. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2021.131738>
- Cowan, A. K., & Wolstenholme, B. N. (2016). Avocado. *Encyclopedia of Food and Health*, 294–300. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00049-0>
- Cukrov, D., Brizzolara, S., & Tonutti, P. (2019). Physiological and biochemical effects of controlled and modified atmospheres. *Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables*, 425–441. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813278-4.00021-X>
- Dirpan, A., Latief, R., Syarifuddin, A., Rahman, A. N. F., Putra, R. P., & Hidayat, S. H. (2018). The use of colour indicator as a smart packaging system for evaluating mangoes Arummanis (*Mangifera indica* L. var. Arummanisa) freshness. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 157(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/157/1/012031>
- Drago, E., Campardelli, R., Pettinato, M., & Perego, P. (2020). Innovations in smart packaging concepts for food: An extensive review. *Foods*, 9(11), 1628. <https://doi.org/10.3390/foods9111628>
- Ehtesabi, H., & Afkaneh, S. Z. (2025). Smartphone-based label on package for monitoring the freshness of meat: a review. *Food Research International*, 220, 117169. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2025.117169>
- Espinosa-Cruz, C. C., Valle-Guadarrama, S., Ybarra-Moncada, Ma. C., & Martínez-Damián, M. T. (2014). Comportamiento postcosecha de frutos de aguacate ‘Hass’ afectado por temperatura y atmósfera modificada con microperforado. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37(3), 235. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v37n3/v37n3a9.pdf>
- Fan, L., Chen, Y., Zeng, Y., Yu, Z., Dong, Y., Li, D., Zhang, C., & Ye, C. (2024). Application of visual intelligent labels in the assessment of meat freshness.

- Feng, T., Chen, H., & Zhang, M. (2023). Applicability and freshness control of pH-sensitive intelligent label in cool chain transportation of vegetables. *Foods* 2023, Vol. 12, Page 3489, 12(18), 3489. <https://doi.org/10.3390/FOODS12183489>
- Ford, N. A., Spagnuolo, P., Kraft, J., & Bauer, E. (2023). Nutritional composition of 'Hass' avocado pulp. *Foods* 2023, Vol. 12, Page 2516, 12(13), 2516. <https://doi.org/10.3390/FOODS12132516>
- Forney, C. F., & Yaganza, E. S. (2011). Fresh-cut produce packaging and the use of biaxial stretched films. *Biaxial Stretching of Film*, 143–164. <https://doi.org/10.1533/9780857092953.2.143>
- George, J., Kumar, R., Aaliya, B., & Sunooj, K. V. (2023). Packaging solutions for monitoring food quality and safety (pp. 411–442). In *Engineering Aspects of Food Quality and Safety*. Springer https://doi.org/10.1007/978-3-031-30683-9_14
- Ghidelli, C., & Pérez-Gago, M. B. (2018). Recent advances in modified atmosphere packaging and edible coatings to maintain quality of fresh-cut fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(4), 662–679. <https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1211087>
- Hailu, F. W., Fanta, S. W., Tsige, A. A., & Delele, M. A. (2025). Current status and challenges of colorimetric intelligent packaging for fruit and vegetables: A review. *Journal of Food Quality*, 2025(1), 6669828. <https://doi.org/10.1155/JFQ/6669828>
- Heo, W., & Lim, S. (2024). A Review on gas indicators and sensors for smart food packaging. *Foods*, 13(19), 3047. <https://doi.org/10.3390/Foods13193047>
- Hurtado-Fernández, E., Fernández-Gutiérrez, A., & Carrasco-Pancorbo, A. (2018). Avocado fruit—*Persea americana*. *Exotic Fruits Reference Guide*, 37–48. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803138-4.00001-0>
- Jia, H., Wu, C., Huang, M., & Zhu, Q. (2025). An intelligent fruit freshness monitoring system using hydrophobic indicator labels based on methylcellulose, k-carrageenan, and sodium tripolyphosphate, combined with deep learning. *International Journal of Biological Macromolecules*, 291, 140001. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.140001>
- Kaewprachu, P., Romruen, O., Jaisan, C., Rawdkuen, S., & Klunklin, W. (2024). Smart colorimetric sensing films based on carboxymethyl cellulose incorporated with a natural pH indicator. *International Journal of Biological Macromolecules*, 259, 129156. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.129156>
- Karaca, I. M., Haskaraca, G., Ayhan, Z., & Gültekin, E. (2023). Development of real time-pH sensitive intelligent indicators for monitoring chicken breast

- freshness/spoilage using real packaging practices. *Food Research International*, 173, 113261. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113261>
- Kim, Y. H., Yang, Y. J., Kim, J. S., Choi, D. S., Park, S. H., Jin, S. Y., & Park, J. S. (2018). Non-destructive monitoring of apple ripeness using an aldehyde sensitive colorimetric sensor. *Food Chemistry*, 267, 149–156. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.02.110>
- Kirtil, E., Kilercioglu, M., & Oztop, M. H. (2016). Modified atmosphere packaging of foods. *Reference Module in Food Science*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03218-2>
- Kumar, A., Pramanik, J., Batta, K., Bamal, P., Prajapati, B., & Singh, S. (2024). Applications of value-added natural dye fortified with biopolymer-based food packaging: sustainability through smart and sensible applications. *International Journal of Food Science and Technology*, 59(3), 1268–1280. <https://doi.org/10.1111/IJFS.16922>
- Kuswandi, B. (2022). Toward smarter food packaging. in *food packaging: The smarter way* (pp. 11–29). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7196-8_2
- Kuswandi, B., Maryska, C., Jayus, Abdullah, A., & Heng, L. Y. (2013). Real time on-package freshness indicator for guavas packaging. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 7(1), 29–39. <https://doi.org/10.1007/S11694-013-9136-5/FIGURES/10>
- Kuswandi, B., Wicaksono, Y., Jayus, Abdullah, A., Heng, L. Y., & Ahmad, M. (2011). Smart packaging: sensors for monitoring of food quality and safety. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 5(3–4), 137–146. <https://doi.org/10.1007/s11694-011-9120-x>
- Lee, E. J., & Shin, H. S. (2019). Development of a freshness indicator for monitoring the quality of beef during storage. *Food Science and Biotechnology*, 28(6), 1899–1906. <https://doi.org/10.1007/S10068-019-00633-5/TABLES/3>
- Lee, K., Baek, S., Kim, D., & Seo, J. (2019). A freshness indicator for monitoring chicken-breast spoilage using a Tyvek® sheet and RGB color analysis. *Food Packaging and Shelf Life*, 19, 40–46. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2018.11.016>
- Lee, K., Park, H., Baek, S., Han, S., Kim, D., Chung, S., Yoon, J.-Y., & Seo, J. (2019). Colorimetric array freshness indicator and digital color processing for monitoring the freshness of packaged chicken breast. *Food Packaging and Shelf Life*, 22, 100408. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2019.100408>
- Liu, D., Cui, Z., Shang, M., & Zhong, Y. (2021). A colorimetric film based on polyvinyl alcohol/sodium carboxymethyl cellulose incorporated with red cabbage anthocyanin for monitoring pork freshness. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, 100641. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2021.100641>

- Liu, D., Zhang, C., Pu, Y., Chen, S., Liu, L., Cui, Z., Zhong, Y., Liu, D., Zhang, C., Pu, Y., Chen, S., Liu, L., Cui, Z., & Zhong, Y. (2022). Recent advances in pH-responsive freshness indicators using natural food colorants to monitor food freshness. *Foods* 2022, Vol. 11, Page 1884, 11(13), 1884. <https://doi.org/10.3390/FOODS11131884>
- Luo, X., Zaitoon, A., & Lim, L. T. (2022). A review on colorimetric indicators for monitoring product freshness in intelligent food packaging: Indicator dyes, preparation methods, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(3), 2489–2519. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12942>;SUBPAGE:STRING:ACCESS
- Mahajan, P. V., & Lee, D. S. (2023). Modified atmosphere and moisture condensation in packaged fresh produce: Scientific efforts and commercial success. *Postharvest Biology and Technology*, 198, 112235. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2022.112235>
- Mitcham, E. J., Kader, A. A., Reid, M. S., Saltveit, M. E., & Thompson, J. F. (2023). Controlled and modified atmospheres during storage and transport. In *Postharvest technology of horticultural crops. Atmospheric environment* (Fourth edition, Vol. 3, pp. 1–10). University of California Agriculture and Natural Resources. https://www.google.com.mx/books/edition/Postharvest_Technology_of_Horticultural/7n_qEAAQBAJ?hl=en&gbpv=0
- Niponsak, A., Laohakunjit, N., Kerdchoechuen, O., & Wongsawadee, P. (2016). Development of smart colourimetric starch-based indicator for liberated volatiles during durian ripeness. *Food Research International*, 89, 365–372. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2016.08.038>
- Obaidi, A. Al, Karaca, I. M., Ayhan, Z., Haskaraca, G., & Gultekin, E. (2022). Fabrication and validation of CO₂-sensitive indicator to monitor the freshness of poultry meat. *Food Packaging and Shelf Life*, 34, 100930. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100930>
- Oliveira, M., Abadias, M., Usall, J., Torres, R., Teixidó, N., & Viñas, I. (2015). Application of modified atmosphere packaging as a safety approach to fresh-cut fruits and vegetables – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 46(1), 13–26. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2015.07.017>
- Padmanabhan, P., & Paliyath, G. (2019). Hexanal-based technologies for phospholipase d inhibition and enhancement of shelf life and quality in fruits and vegetables. *Comprehensive Biotechnology*, 360–364. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64046-8.00230-5>
- Panwar, A., Kumar, S., Dhiman, A., Kumar, V., Gupta, D., & Sharma, A. (2024). pH sensitive indicator film based intelligent packaging systems of perishables: Developments and challenges of last decade. *Microchemical Journal*, 207, 111732. <https://doi.org/10.1016/J.MICROC.2024.111732>
- Qiao, J., Zhang, M., Qiu, L., Mujumdar, A. S., & Ma, Y. (2024). Visual early warning and prediction of fresh food quality deterioration: Research progress

- and application in supply chain. *Food Bioscience*, 58, 103671. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2024.103671>
- Rashvand, M., Matera, A., Altieri, G., Genovese, F., Fadiji, T., Linus Opara, U., Mohamadifar, M. A., Feyissa, A. H., & Carlo Di Renzo, G. (2023). Recent advances in the potential of modeling and simulation to assess the performance of modified atmosphere packaging (MAP) systems for the fresh agricultural product: Challenges and development. *Trends in Food Science & Technology*, 136, 48–63. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2023.04.012>
- Rong, L., Zhang, T., Ma, Y., Wang, T., Liu, Y., & Wu, Z. (2023). An intelligent label using sodium carboxymethyl cellulose and carrageenan for monitoring the freshness of fresh-cut papaya. *Food Control*, 145, 109420. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109420>
- Rukchon, C., Nopwinyuwong, A., Trevanich, S., Jinkarn, T., & Suppakul, P. (2014). Development of a food spoilage indicator for monitoring freshness of skinless chicken breast. *Talanta*, 130, 547–554. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.07.048>
- Saltveit, M. E. (2020). Biological basis for CA and MA. In *Controlled and Modified Atmospheres for Fresh and Fresh-Cut Produce* (pp. 3–22). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804599-2.00002-8>
- Sarma, P. P., Barman, K., & Baruah, P. K. (2023). Industrial barriers for the application of active and intelligent packaging. In Inamuddin, T. Altalhi, & J. N. Cruz (Eds.), *Green Sustainable Process for Chemical and Environmental Engineering and Science* (pp. 71–96). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95644-4.00009-7>
- Shaik, M. I., Azhari, M. F., & Sarbon, N. M. (2022). Gelatin-based film as a color indicator in food-spoilage observation: A Review. *Foods 2022, Vol. 11, Page 3797*, 11(23), 3797. <https://doi.org/10.3390/FOODS11233797>
- Shao, P., Liu, L., Yu, J., Lin, Y., Gao, H., Chen, H., & Sun, P. (2021). An overview of intelligent freshness indicator packaging for food quality and safety monitoring. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 285–296. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2021.10.012>
- Shao, P., Liu, L., Yu, J., Zheng, L., & Sun, P. (2022). Novel aldehyde sensitive bio-based colorimetric film for kiwi fruit freshness monitoring. *LWT*, 159, 113177. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2022.113177>
- Tang, T., Zhang, M., Jia, H., Bhandari, B., & Guo, Z. (2025). Intelligent monitoring of fruit and vegetable freshness in supply chain based on 3D printing and lightweight deep convolutional neural networks (DCNN). *Food Chemistry*, 480, 143886. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2025.143886>
- Vakkalanka, M. Sr., D'Souza, T., Ray, S., Yam, K. L., & Mir, N. (2012). Emerging packaging technologies for fresh produce. *Emerging Food Packaging Technologies*, 109–133. <https://doi.org/10.1533/9780857095664.1.109>

- Valle-Guadarrama, S., Morales-Cabrera, M., Peña-Valdivia, C. B., Mora-Rodríguez, B., Alia-Tejacal, I., Corrales-García, J., & Gómez-Cruz, A. (2013). Oxidative/fermentative behavior in the flesh of 'hass' avocado fruits under natural and controlled atmosphere conditions. *Food and Bioprocess Technology*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0747-8>
- Vázquez-López, Y., Iribe-Salazar, R., Carrasco-Escalante, M., Gaxiola-Camacho, S., & Caro-Corrales, J. (2022). Quality variables of 'Hass' avocado stored in modified atmosphere packaging. *Agrociencia*. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v56i4.2460>
- Wang, C., Yusufu, D., & Mills, A. (2019). A smart adhesive "consume within" (CW) indicator for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 22, 100395. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2019.100395>
- Warsiki, E., & Rofifah, N. (2018). Dragon fruit freshness detector based on methyl red colour indicator. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 209(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/209/1/012016>
- Xiong, G., Zhou, X., Zhang, C., & Xu, X. (2024). A comprehensive review of intelligent packaging materials based on biopolymers: Role of anthocyanins, type and properties of materials, and their application in monitoring meat freshness. *International Journal of Biological Macromolecules*, 282, 137462. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.137462>
- Yadav, S. N., Rai, S., Bhattarai, A., & Sinha, B. (2024). Interaction between methyl red and cetyltrimethylammonium bromide under the influence of sodium polystyrene sulphonate in ethanol-water binary solvent systems: A spectrophotometric investigation. *Heliyon*, 10(12), e33014. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2024.E33014>
- Yahia, E. M. (2012). Avocado. *Crop post-harvest: Science and Technology: Perishables*, 159–186. <https://doi.org/10.1002/9781444354652.CH8>
- Yahia, E. M. (2023). *Sustainable production and postharvest handling of avocado* (1st ed.). Burleigh Dodds Science Publishing. <https://doi.org/10.19103/AS.2023.0144>
- Yahia, E. M., & Woolf, A. B. (2011). Avocado (*Persea americana* Mill.). *Postharvest Biology and Technology of Tropical and Subtropical Fruits*, 2, 125–186e. <https://doi.org/10.1533/9780857092762.125>
- Yekta, R., Abedi-Firoozjah, R., Azimi Salim, S., Khezerlou, A., Abdolmaleki, K., Yekta, R., Abedi-Firoozjah, R., Azimi Salim, S., Khezerlou, A., & Abdolmaleki, K. (2023). Application of cellulose and cellulose derivatives in smart/intelligent bio-based food packaging. *Cellulose* 2023 30:16, 30(16), 9925–9953. <https://doi.org/10.1007/S10570-023-05520-1>
- Yildirim-Yalcin, M., Tornuk, F., & Toker, O. S. (2022). Recent advances in the improvement of carboxymethyl cellulose-based edible films. *Trends in Food Science & Technology*, 129, 179–193. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2022.09.022>

- Yuan, S., Zuo, J., Li, X., Fan, X., Li, X., Wang, Q., & Zheng, S. (2021). Micro-perforated packaging delays leaf yellowing and maintains flavor of postharvest pak choi (*Brassica rapa* subsp. *chinensis*) following low-temperature storage. *Food Packaging and Shelf Life*, 29, 100681. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2021.100681>
- Zhai, X., Xue, Y., Sun, Y., Ma, X., Ban, W., Marappan, G., Tahir, H. E., Huang, X., Wu, K., Chen, Z., Zou, W., Liu, B., Zhang, L., Yang, Z., & Katona, J. (2025). Colorimetric food freshness indicators for intelligent packaging: progress, shortcomings, and promising solutions. *Foods* 2025, Vol. 14, Page 2813, 14(16), 2813. <https://doi.org/10.3390/FOODS14162813>
- Zhang, Y., & Lim, L. T. (2018). Colorimetric array indicator for NH₃ and CO₂ detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 255, 3216–3226. <https://doi.org/10.1016/J.SNB.2017.09.148>

3. DESARROLLO DE UNA BIOPELÍCULA INDICADORA COLORIMÉTRICA PARA MONITOREAR CO₂

Resumen

El monitoreo de la concentración de CO₂ generada por la respiración de los productos hortícolas es esencial para evaluar su calidad durante el almacenamiento en atmósfera modificada, ya que su acumulación excesiva en el espacio de cabeza del envase puede inducir efectos negativos. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue desarrollar una biopelícula indicadora a base de carboximetilcelulosa incorporada con una mezcla de tres indicadores ácido-base (rojo de metilo, azul de bromotimol y azul de timol), para monitorear las concentraciones de CO₂ en el espacio de cabeza de un envase mediante un cambio de color visual. Además, se caracterizaron las soluciones indicadoras y la biopelícula para evaluar su sensibilidad al CO₂. Los resultados demostraron que el uso de indicadores mixtos generó una amplia variación de pH de 4 a 9 con cambios de color de rojo a verde. Asimismo, la biopelícula indicadora presentó alta sensibilidad exhibiendo cambios de color al reaccionar con el CO₂. En la aplicación real, los cambios de color (ΔE) de biopelícula mostraron una buena correlación con el incremento de la concentración de CO₂ dentro del espacio de cabeza. Sin embargo, su capacidad de detección fue limitada debido a que sólo permitió detectar concentraciones bajas de CO₂ ($\leq 12\%$), exhibiendo un cambio de color rápido de verde a naranja, seguido de un cambio de color gradual hacia un tono naranja. Por lo tanto, la biopelícula indicadora presenta un alto potencial para la detección de CO₂, pero requiere ajustes de pH y optimización para mejorar su desempeño.

Palabras clave: envases inteligentes, indicadores ácido-base, pH, carboximetilcelulosa, atmósfera modificada.

Tesis de Maestría en Ciencias, Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Luciano López Gómez

Director de tesis: Salvador Valle Guadarrama, Dr.

DEVELOPMENT OF A COLORIMETRIC INDICATOR BIOFILM FOR MONITORING CO₂

Abstract

Monitoring the CO₂ concentration generated by the respiration of horticultural products is essential for evaluating their quality during modified atmosphere storage, as excessive accumulation in the headspace of the packaging can induce negative effects. Therefore, the objective of this work was to develop an indicator biofilm based on carboxymethylcellulose incorporated with a mixture of three acid-base indicators (methyl red, bromothymol blue, and thymol blue) to monitor CO₂ concentrations in the headspace of the packaging through a visual color change. In addition, the indicator solutions and the biofilm were characterized to evaluate their sensitivity to CO₂. The results demonstrated that the use of mixed indicators generated a wide pH range of 4 to 9 with color changes from red to green. Furthermore, the indicator biofilm exhibited high sensitivity, displaying color changes upon reacting with CO₂. In the actual application, the color changes (ΔE) of the biofilm showed a good correlation with the increase in CO₂ concentration within the headspace. However, its detection capability was limited because it only detected low concentrations of CO₂ ($\leq 12\%$), exhibiting a rapid color change from green to orange, followed by a gradual change to a neutral orange hue. Therefore, the indicator biofilm shows high potential for CO₂ detection, but requires pH adjustments and optimization to improve its performance.

Key words: acid-base indicators, carboxy methyl cellulose, intelligent packaging, modified atmosphere, pH.

Master of Science Thesis, Graduate program in Agri-Food Science and Technology, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Luciano López Gómez

Thesis advisor: Salvador Valle Guadarrama. Dr.

3.1. Introducción

La monitorización del metabolismo respiratorio de las frutas durante el almacenamiento en atmósferas modificadas es fundamental, ya que está directamente relacionado con la senescencia y la vida útil del producto (Beshai et al., 2020; Lin et al., 2020). Además, durante el almacenamiento y transporte, las frutas continúan respirando, consumiendo O_2 y liberando CO_2 . A medida que los frutos maduran y se descomponen, su tasa respiratoria se acelera, lo que conduce a un aumento en la cantidad de CO_2 (Tang et al., 2025). Por lo tanto, este gas es un indicador fundamental de la actividad respiratoria, la maduración y el deterioro de las frutas, lo que a su vez puede servir como indicador de la calidad de la fruta (Tang et al., 2025; Zhai et al., 2025).

En este contexto, es necesario desarrollar tecnologías sencillas, económicas y fiables para supervisar la calidad de los frutos envasados en atmósfera modificada (K. Lee, Baek, et al., 2019). Para abordar estas necesidades, los envases inteligentes se han convertido de un a tecnología innovadora, fiable y de bajo costo que permite monitorear la calidad de los productos y proporcionar información en tiempo real. Particularmente, los envases inteligentes con indicadores sensibles al pH, ha sido ampliamente adoptado en la industria alimentaria, ya que son fáciles de preparar y rentable (Jia et al., 2025). Como se ha mencionado, durante el proceso metabólico de la fruta, el CO_2 comienza a acumularse en el espacio de cabeza del envase, lo que provoca una disminución del pH dentro del envase. Este cambio de pH puede ser detectado mediante un indicador sensible a pH, ya que el CO_2 puede reaccionar con los indicadores, provocando un cambio de color visible (Jia et al., 2025; Obaidi et al., 2022). Por lo tanto, esta tecnología podría monitorear el comportamiento respiratorio de la fruta.

Actualmente se ha desarrollado muchos indicadores colorimétricos para monitorear la calidad de los productos cárnicos y pesqueros. No obstante, la aplicación de esta tecnología a los productos hortofrutícolas aún es limitado. Para

el desarrollo de los indicadores en forma de películas o etiquetas, se basan generalmente en el uso de uno o más colorantes sensibles al pH inmovilizados en una matriz polimérica (Panwar et al., 2024; Zhai et al., 2025). En estudios previos, se ha utilizado diversos indicadores para monitorear la calidad y frescura de los alimentos, entre ellos se destacan el rojo de metilo, azul de bromotimol, azul de timol, rojo de fenol y verde de bromocresol (H. Chen et al., 2018, 2019; Feng et al., 2023; Jia et al., 2025; Karaca et al., 2023; Ran et al., 2021; Rong et al., 2023, 2024; Wang et al., 2019). La aplicación de estos indicadores puede ser de manera individual o mixta para una mayor efectividad. También se han desarrollado indicadores que emplean con colorantes naturales, pero aún presentan muchos desafíos debido a su inestabilidad en condiciones ambientes cambiantes (Obaidi et al., 2022). Por lo tanto, en este trabajo se desarrolló un indicador colorimétrico en forma de película basada en el uso de indicadores mixto sensible al pH como el rojo de metilo, azul de bromotimol y el azul de timol. Esta película indicadora fue diseñada específicamente para detectar los niveles de concentración de CO₂ en el espacio de cabeza de atmósfera modificada de frutos de aguacate 'Hass'. Además, se realizó una prueba de sensibilidad para evaluar el rendimiento de las películas indicadoras, lo que garantizó el cambio de color al entrar en contacto con el CO₂ y se realizó un análisis de espectroscopia FTIR para determinar el comportamiento en tiempo real de la película indicadora durante el almacenamiento del fruto.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Materiales

Para la preparación de la biopelícula indicadora, la carboximetilcelulosa (CMC) utilizada como matriz polimérica se adquirió de Laboratorios Laitz; el rojo de metilo, el azul de bromotimol y el azul de timol fueron adquiridos de Meyer; el glicerol se obtuvo de Hycel; el alcohol de 96°, NaOH y el HCl fueron reactivos de grado analítico; los frutos de aguacate 'Hass' como modelo de trabajo fueron adquiridas en un supermercado local.

3.2.2. Bases para el desarrollo de las biopelículas indicadoras

3.2.2.1. Preparación de solución de indicadores acido-base

Los indicadores ácido-base desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de biopelículas indicadoras. En diversos estudios han demostrado ser efectivos para indicar la frescura de los alimentos mediante un cambio de color visible. Este cambio de color se debe a la sensibilidad de los indicadores a las variaciones de pH. En este caso, se ha utilizado indicadores como el rojo de metilo, el azul de bromotimol y el azul de timol para monitorear la frescura de diversos alimentos. Además, se ha demostrado que la combinación de dos o más de estos indicadores es más eficaz que utilizar un solo indicador, por ejemplo, la combinación de rojo de metilo con azul de bromotimol se ha utilizado para monitorear la frescura de postres (Nopwinyuwong et al., 2010), carne de pollo (Rukchon et al., 2014), carne de cerdo (H. Chen et al., 2019) y pimientos verdes (H. Chen et al., 2018). Del mismo modo, el azul de timol se ha empleado para monitorear la frescura de camarón (M. Chen et al., 2023), y la combinación de azul de timol con otros indicadores se ha utilizado para evaluar el deterioro de la carne de pollo (Magnaghi et al., 2020). Por lo tanto, en esta investigación se decidió utilizar estos indicadores para monitorear el comportamiento respiratorio de las frutas bajo condiciones de atmósfera modificada. Para ello, se prepararon soluciones madre de los indicadores acido-base a una concentración de 0.1% p/v disolviendo rojo de metilo (RM), azul de bromotimol (ABT) y azul de timol (AT) en etanol al 96 % (H. Chen et al., 2018; Feng et al., 2023). Posteriormente, las soluciones preparadas se mezclaron a una proporción 1:1:1 con el propósito de obtener una solución mixta, capaz de demostrar una amplia gama de variación de colores en diferentes niveles de pH de 4.2 a 9.6.

3.2.2.2. Sensibilidad de la solución indicadora en función del pH

Como se indicó en la sección anterior, los indicadores acido-base experimentan un cambio de color en función de las variaciones de pH. Como se muestra en la **Figura 3**, el rojo de metilo cambia de color rojo a amarillo en el rango de pH de

4.2 a 6.2. El azul de bromotimol cambia de amarillo a azul a medida que el pH cambia de 6.0 a 7.6, mientras que el azul de timol cambia de forma similar en el rango de pH de 8.0 a 9.6. Por lo tanto, la combinación de partes iguales de estos tres indicadores da como resultado un amplio rango de detección de pH y en consecuencia conduce a un cambio secuencial de color de rojo a azul verdoso. Para verificar las transiciones de color a diferentes niveles de pH, se añadieron 500 μ L de la solución indicadora mixta en un vaso de precipitado que contenía 25 mL de agua destilada a pH 4. A continuación, se ajustó el nivel de pH de forma gradual desde un pH inicial de 4 a 9 mediante la adición de NaOH o HCl al 0.1 N, según lo requerido. Para la medición de pH de la solución se utilizó un potenciómetro (Hanna Instruments). Posteriormente, en los diferentes rangos de pH se determinaron la transmitancia con un espectrofotómetro (DR 500 UV-Vis HACH, USA) a 615 nm y los parámetros de color se determinaron con un colorímetro.

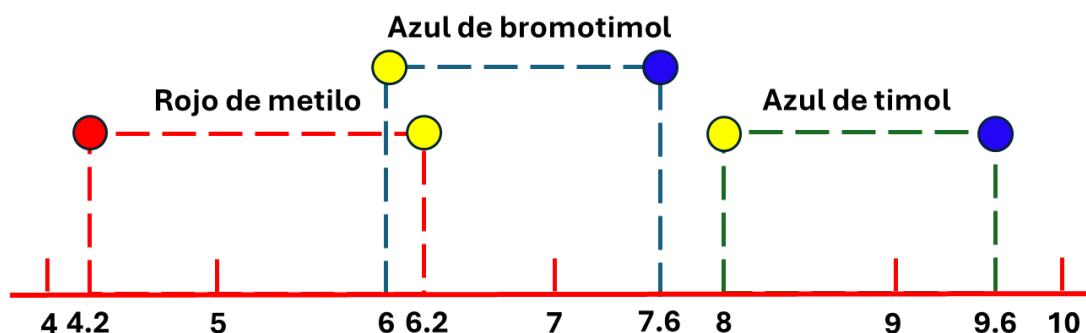


Figura 3. Cambios de color en los diferentes pH de los indicadores ácido-base.

3.2.2.3. Sensibilidad a contacto con CO₂

Antes de utilizar los indicadores en el desarrollo de las biopelículas indicadoras, la solución indicadora mixta se sometió a una prueba de sensibilidad para determinar las variaciones de pH al entrar en contacto con el CO₂. Para ello, se agregaron 3 mL de la solución en tubos Vacutainer® de 11 mL. La solución fue ajustado inicialmente a un pH de 9 con NaOH al 0.1 N para garantizar una disminución del pH al interactuar con el CO₂. Posteriormente, se inyectó CO₂ en los tubos con una jeringa de insulina en un rango de 0 a 1.2 % (v/v) y se agito

durante 15 s en cada tubo. Se determinó la transmitancia con un espectrofotómetro a 615 nm.

3.2.3. Desarrollo de la biopelícula indicadora sensible a pH

Para la obtención de las biopelículas indicadoras, se disolvieron 1 % (p/v) de carboximetilcelulosa y 0.6 % (p/v) de glicerol en 100 mL de agua destilada mediante agitación magnética. A continuación, se agregaron 2 mL de la solución indicadora mixta preparada en la sección 3.2.2.1 y se agitó la mezcla a una velocidad baja durante 2 h o hasta obtener una mezcla completa. El pH inicial se ajustó aproximadamente a 9 con NaOH al 0.1 N. Posteriormente, de la mezcla homogénea se vaciaron 30 g en una caja de Petri (d=90 mm) para proceder al secado a una temperatura de 45 ± 10 °C durante 14 h en una estufa de secado. Después del proceso de secado, la película se despegó de la caja y se colocó sobre la superficie de papel filtro Whatman No. 4 con el propósito de proporcionar un soporte y un fondo blanco uniforme que permitiera la observación precisa de los cambios de color. Por último, se cortaron en probetas de 1.5 x 1.5 cm para su posterior aplicación.

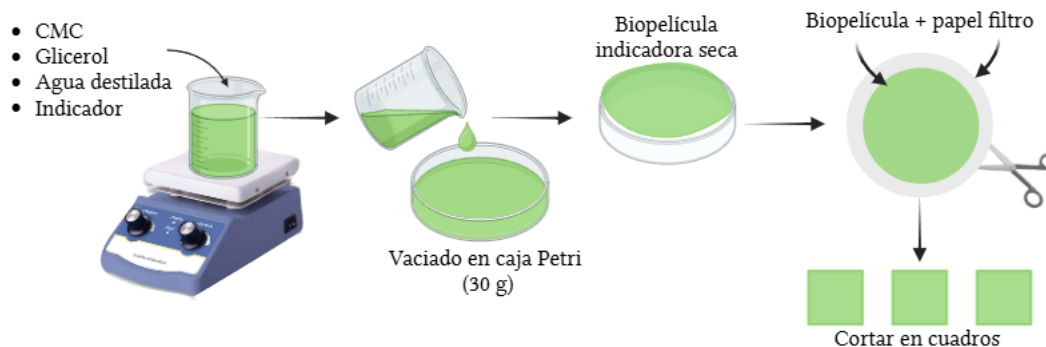


Figura 4. Esquema de elaboración de las biopelículas indicadoras.

3.2.4. Caracterización de la biopelícula indicadora sensible a pH

Se analizaron los cambios de color de las biopelículas indicadoras causado por el contacto con el CO₂, colocando probetas de 1.5 x 1.5 cm en tubos Vacutainer® de 11 mL. Para ello, se inyectó un mL de CO₂ de alta pureza (0.99 %) en los tubos con una jeringa de insulina y fueron almacenados a 24 °C. El cambio de

color de las probetas se evaluó de manera visual con el fin de verificar si las biopelículas tenían la capacidad de absorber el CO₂ y provocar un cambio de color durante el tiempo de exposición al gas. Posteriormente, las probetas se caracterizaron instrumentalmente por cada 15 min durante 135 min con un colorímetro, el cual se determinó los parámetros de color como se ha descrito en la sección 3.2.6 y se calculó la diferencia de color total (ΔE) con la ecuación 3. Los datos se ajustaron a modelos de regresión no lineal.

3.2.5. Validación de la biopelícula indicadora en condiciones reales de envasado

La aplicación y evaluación de la biopelícula indicadora en un envase inteligente, se envasaron 384 g de aguacate 'Hass' en un envase de tereftalato de polietileno de un litro. Las biopelículas, se pegaron en la superficie interior de la tapa del envase, sin entrar en contacto con los frutos. Después de tapar los recipientes (**Figura 5**) fueron almacenados a 24 °C durante 11 h para su monitoreo. El cambio de color y la concentración de CO₂ fueron monitoreados en tiempos discontinuos. Las primeras 2 h del experimento, las mediciones se realizaron cada 0.5 h debido al rápido cambio de color de los indicadores. A medida que el cambio de color disminuía, el intervalo de medición se aumentó a una hora y después, al observar cambios menores, las mediciones se realizaron cada 2 horas. Los cambios de color de las películas indicadoras se evaluaron con un colorímetro como se ha descrito en la sección 3.2.6 y se calculó la diferencia de color total (ΔE).



Figura 5. Almacenamiento de aguacate 'Hass' en envases de PET con la biopelícula indicadora sensible al pH.

3.2.6. Análisis del cambio de color

Para analizar el cambio de color, se determinaron los parámetros de color (L^* , a^* , b^*) mediante un colorímetro Hunter Lab (Mini Scan XE Plus 45/0-L, USA). A partir de ello, se obtuvieron los atributos de Luminosidad (L^*), y con los valores de a^* y b^* se obtuvieron el ángulo de tono (Hue) y la cromaticidad (Croma) mediante la ecuación 1 y 2, con el fin de verificar las tonalidades correspondientes. Posteriormente, se calculó la diferencia de color total (ΔE) mediante la ecuación 3 con el propósito de verificar la magnitud del cambio de color.

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$H^\circ = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde los valores L_0^* , a_0^* y b_0^* son el color inicial de las probetas y los valores L^* , a^* y b^* representan el color de las probetas después del cambio.

3.2.7. Análisis de CO₂ en el espacio de cabeza

Para analizar la producción de CO₂ y correlacionar con el cambio de color de las biopelículas indicadoras, se determinó la concentración de CO₂ (% v/v) en el espacio de cabeza del recipiente mediante el método descrito por (García-Cruz et al., 2016). Para ello, se obtuvieron muestras gaseosas de 3 mL del espacio de cabeza de los recipientes y se colocaron en tubos cerrado de 11 mL con 3 mL de una solución de bicarbonato sódico que contenía azul de bromotimol como indicador. Se agitó durante 15 s y se determinó la transmitancia con un espectrofotómetro (DR 500 UV-Vis HACH, USA) a 615 nm. Para cuantificar la concentración de CO₂ en las muestras se preparó una curva estándar utilizando mezclas de CO₂ de concentraciones conocidas en un rango de 0.2 a 12.5 %.

3.2.8. Validación de la biopelícula indicadora en condiciones reales de envasado con microperforaciones

Para validar el funcionamiento de la biopelícula, se realizaron experimentos bajo condiciones reales de almacenamiento. Para ello, se colocaron 308 ± 8 g de frutos de aguacate 'Hass' (madurez fisiológica) en bolsas de polietileno de baja densidad (26.8 cm x 27.3 cm) con diferentes niveles de microperforaciones de 200 μ m: bolsas sin perforaciones (M0) y bolsas con 10 (M10) y 20 (M20) microperforaciones. Las biopelículas se colocaron en la parte superior interna de cada bolsa sin entrar en contacto con el producto, después se cerraron y se almacenaron a 24 °C durante 21 h. Para el muestreo de CO₂ se colocaron previamente en el interior de cada bolsa tubos Vacutainer® de 11 mL con sus respectivos tapones. Estos tubos fueron cerrados de forma secuencial a intervalos de 3 h durante 21 h, sin abrir las bolsas de plástico. La determinación del cambio de color se realizó como se describe en la sección 3.2.6.



Figura 6. Unidad experimental para el monitoreo de CO₂ a 24 °C.

3.2.9. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Se realizó un análisis FTIR de las biopelículas indicadoras para evaluar los cambios estructurales en la biopelícula indicadora después del almacenamiento. El rango espectral de FTIR se estableció de 4000 a 650 cm⁻¹ con 32 escaneos y con una resolución de 2 cm⁻¹, según lo reportado por (Vargas-Torrico et al., 2024).

3.2.10. Análisis de datos

Para el análisis de los datos del cambio de color en función del pH y el cambio de color respecto a la transmitancia se ajustaron mediante regresión lineal. Mientras los cambios de color y la transmitancia respecto a la concentración del CO₂, se sometieron a rutinas de regresión ajustando a modelos no lineales con el software Sigma Plot (SPSS, 2000), con el propósito de predecir la correlación entre las variables mediante un enfoque cinético.

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Sensibilidad de la solución indicadora en función del pH

En el **Cuadro 2** se presentan los atributos de color de la evaluación de la mezcla de indicadores acido-base (rojo de metilo, azul de bromotimol y azul de timol). Con esta información, se determinó que la solución indicadora a diferentes niveles de pH exhibió una amplia gama de colores (rojo, naranja, amarillo, amarillo-verde, verde claro y verde oscuro) a medida que el valor de pH aumentaba de niveles ácidos a niveles más alcalinos (**Figura 7**).

Cuadro 2. Valores promedio de luminosidad, ángulo de matiz y cromaticidad en función del pH.

pH	L*	H*	C*
4	11.01	25.00	30.80
5	15.03	43.50	30.10
6	20.91	78.20	29.41
7	21.00	94.20	29.90
8	16.78	112.60	22.56
9	11.82	136.20	16.74

L*: luminosidad, H*: ángulo de matiz, C*: cromaticidad

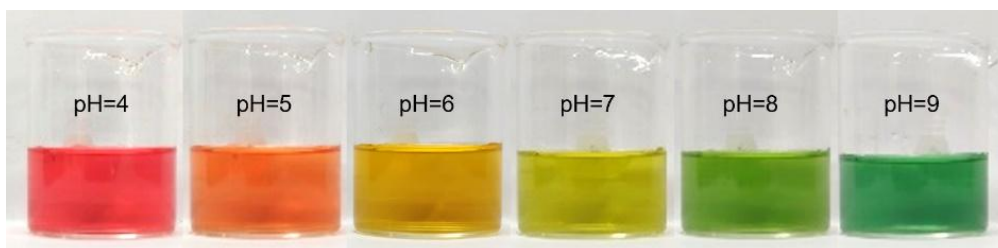


Figura 7. Variación de tonalidades de la mezcla de indicador ácido-base (rojo de metilo, azul de bromotimol y azul de timol) en función del pH.

Además, los valores de ángulo de tono y el pH fueron ajustados mediante regresión lineal (**Figura 8**), obteniéndose un coeficiente de correlación de $R = 0.99$, indicando una correlación positiva altamente significativa entre las dos variables. Por lo tanto, el parámetro de Hue o ángulo de tono, puede predecir con precisión el cambio de pH, lo que validó la sensibilidad de la solución en diferentes niveles de pH. La regresión lineal de Hue con respecto al porcentaje de transmitancia, también mostró una correlación negativa muy significativa, con un coeficiente de correlación de $R = 0.91$, lo que confirmó que el cambio de color de la solución indicadora está realmente influenciado por el cambio de pH. Este cambio de color de los indicadores se debe a su naturaleza ácida o alcalina, ya que en condiciones ácidas sufren un proceso continuo de protonación lo que lleva a cambios en su estructura química, mientras que en condiciones alcalinas sufren desprotonación lo que conduce a la formación de estructuras altamente conjugadas, mostrando así diferentes cambios de color reversible (Li et al., 2024).

3.3.2. Sensibilidad del indicador causado por CO_2

La prueba de sensibilidad de los indicadores ácido-base, se basó en el mismo principio descrito por (García-Cruz et al., 2016), con la modificación de utilizar un indicador mixto y NaOH en lugar de bicarbonato, ya que la capacidad buffer del bicarbonato limita el cambio de color, exhibiendo cambios de color de verde a verde amarillentas, lo que impide observar un cambio de color gradual hasta color rojizo. No obstante, al emplear una base fuerte como el NaOH, la solución se vuelve más sensible permitiendo detectar bajas concentraciones de CO_2 , exhibiendo un cambio de color rápido de verde brillante a rojo brillante. Además,

con esta metodología se podría estandarizar los cambios de perfiles de color para que, a partir de ella, se pueda cuantificar o detectar concentraciones de CO₂ de forma visual, mediante el cambio de color, sin necesidad de utilizar algún equipo o realizar mediciones de absorbancia o transmitancia. En este sentido, esta metodología podría ser una herramienta útil para el monitoreo visual de la concentración de CO₂.

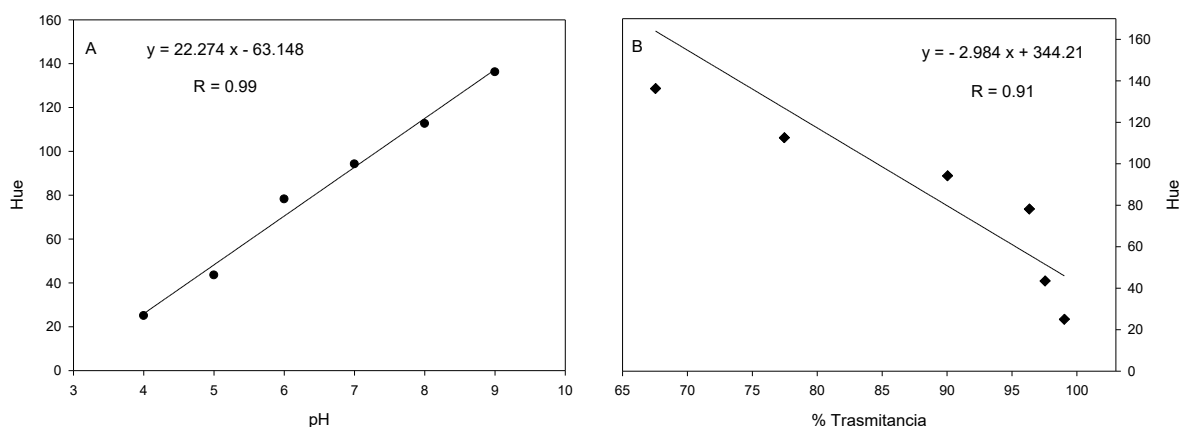


Figura 8. A: regresión lineal entre los valores de Hue y pH, B: regresión lineal entre los valores de Hue y porcentaje de transmitancia.

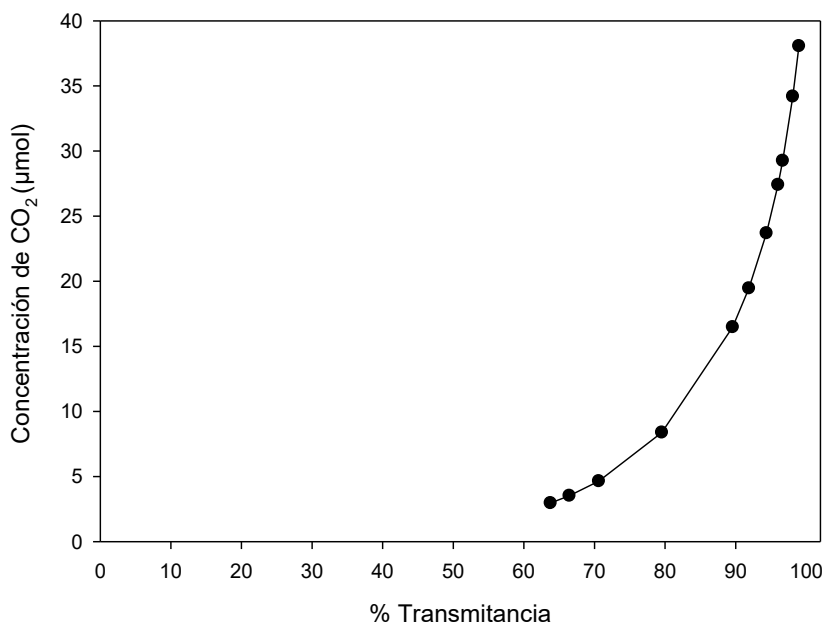


Figura 9. Ajuste de datos de micromoles de CO₂ reaccionados contra transmitancia.

3.3.3. Caracterización de la biopelícula indicadora sensible a pH

De acuerdo con los resultados obtenidos en la caracterización de las biopelículas a partir de una mezcla de indicadores acido-base, se observaron cambios de color tras exponerlas a una atmósfera que contenía un mL de dióxido de carbono durante 135 min. Como se muestra en la **Figura 10**, se observó un cambio progresivo en las tonalidades de las biopelículas indicadoras durante el tiempo de almacenamiento a 24 °C, caracterizado por una disminución del ángulo de tono o Hue y un incremento del cambio de color total (ΔE) de forma exponencial en función del tiempo, indicando un cambio de color verde oscuro a verde-amarillenta con tonalidades de oliva. Los datos se ajustaron bien a modelos de la forma $\Delta E = y_0 + a[1 - \exp(-bt)]$, con un coeficiente de correlación de $R^2 = 0.98$.

El cambio de color total durante los primeros 15 min de exposición al dióxido de carbono, las biopelículas indicadoras de color verde se volvieron verde claro con una ΔE de 10.1, lo que indica una alta sensibilidad del sistema y perceptible a simple vista. Un valor de $\Delta E > 2$ indica que la diferencia de color es perceptible a simple vista (Rong et al., 2024), Por lo tanto, cualquier valor de $\Delta E > 2$ entre dos puntos de la **Figura 10**, se considera perceptible a simple vista. Este comportamiento, se debieron a la liberación de CO₂ en el espacio de cabeza de los tubos formando ácido carbónico al entrar en contacto con la humedad de las biopelículas. Esto dio lugar a la producción de iones H⁺ que protonaron las moléculas del colorante del indicador, provocando un cambio de color (Karaca et al., 2023; Y. Zhang & Lim, 2018).

La sensibilidad de los indicadores como el rojo de metilo y el azul de bromotimol, han sido confirmado por los estudios realizados por (Nopwinyuwong et al., 2010; Rukchon et al., 2014), quienes desarrollaron un indicador colorimétrico basado en colorantes de pH mixto (rojo de metilo y azul de bromotimol) y evaluaron el cambio de color de la etiqueta tras la exposición a diferentes concentraciones de dióxido de carbono durante 30 min a 30 °C, observándose una buena correlación

entre el cambio de color y los niveles de dióxido de carbono. Sin embargo, la integración del azul de timol y mezclarlo en proporciones iguales, aún no ha sido demostrado la sensibilidad de dicha mezcla. Por lo tanto, los resultados de la presente investigación demuestran la capacidad que tiene la biopelícula desarrollada, por lo que la convierte en una herramienta útil para el monitoreo de la concentración del CO₂ en el espacio de cabeza. Además, la respuesta frente a este gas se produce de manera casi inmediata, por lo que es posible utilizarlo para evaluar la concentración de CO₂ de un producto almacenado en atmósfera modificada, ya sea en horas o días.

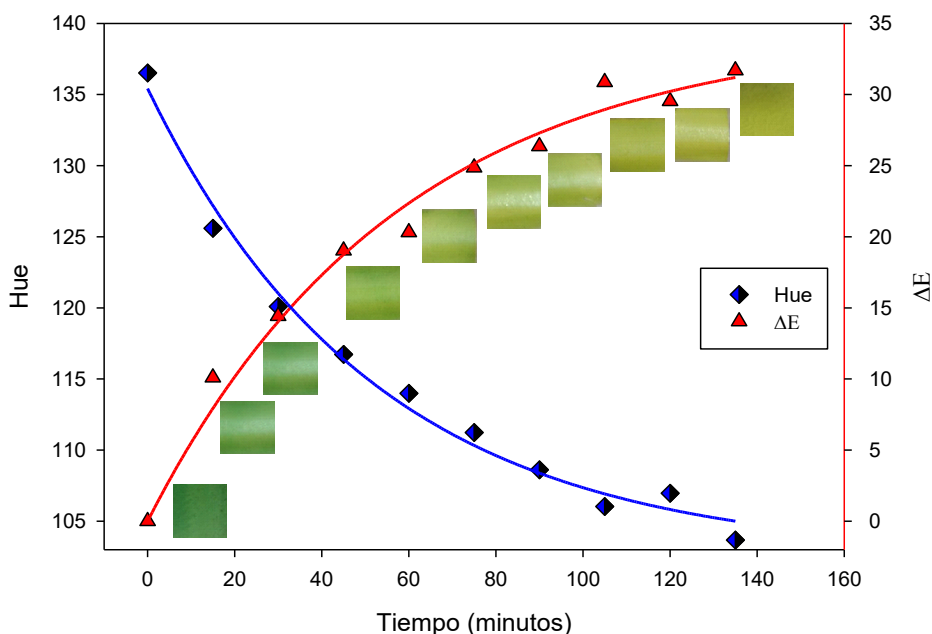


Figura 10. Cinética de color de biopelículas expuesto a una concentración de CO₂ a 24 °C.

3.3.4. Resultado de la validación de la biopelícula indicadora en condiciones reales de envasado

3.3.4.1. Concentración de CO₂ en el espacio de cabeza

Los cambios en la concentración de CO₂ en el espacio de cabeza de los envases que contenían frutos de aguacate ‘Hass’, se ajustaron a modelos de la forma, $CO_2 = y_0 + a[1 - \exp(-bt)]$, obteniéndose un coeficiente de determinación de (R^2) igual a 0.9. Como se aprecia en línea roja de la **Figura 11**, la concentración de

CO₂ se incrementó con el tiempo en forma exponencial debido a la disminución de oxígeno dentro del sistema. Este comportamiento se ha observado en los estudios realizados por (Espinosa-Cruz et al., 2014), quienes observaron un incremento de CO₂ en forma logarítmica durante el tiempo de almacenamiento, con cambios rápidos al inicio y con tendencia tangencial hacia un valor constante al final.

3.3.4.2. Cambios de color de la biopelícula indicadora

Después del monitoreo del comportamiento respiratorio de los frutos de aguacate 'Hass', el cambio de color de las biopelículas indicadoras sensibles a pH se muestra en la **Figura 11**. Como se aprecia, las biopelículas respondieron al incremento de la concentración de CO₂ dentro del envase, generando un cambio de color de verde a naranja a medida que aumentaba la presencia de CO₂ durante el almacenamiento de los frutos del aguacate 'Hass' a 24 °C. Sin embargo, fue en los primeros 30 min, donde se observó un cambio rápido de color en las biopelículas, pasando de color verde a amarillo fuerte con una ΔE de 34.56. Después de los 30 min a 1 h, el color amarillo fuerte se convirtió en naranja moderado con ΔE de 39.68. Posteriormente, el cambio de color fue de manera gradual con $\Delta E \leq 2$ hasta convertirse en color naranja fuerte, lo cual ya no se presenta diferencias tan significativas debido a que la concentración de dióxido de carbono ya no siguió incrementando.

Estos resultados demuestran que las biopelículas desarrolladas son sensibles, incluso cuando se expone a bajas concentraciones de dióxido de carbono. Sin embargo, se requiere un umbral de concentración para responder, ya que no exhiben cambios de color cuando la concentración es demasiada baja (B. Chen et al., 2023). Además, el valor de pKa del ácido carbónico resultante de la disociación del CO₂ en agua es de 6.35, por lo tanto, se requieren utilizar indicadores ácido-base con valores de pKa mayor a 6.35 para garantizar un cambio de color al reaccionar con el CO₂. Así como la adición de NaOH para aumentar aún más el pH de los indicadores, ya que la respuesta de las

biopelículas indicadoras, se basan en la liberación del dióxido de carbono que se acumula en el espacio de cabeza, lo que conduce a la formación de ácido carbónico por la presencia de humedad, que posteriormente se descompone en H^+ (protones) y HCO_3^- (iones de bicarbonato). Después, los protones reaccionan con los indicadores ácido-base previamente dopados con NaOH, lo que da lugar a la formación de sus formas protonadas. El aumento de la concentración de H^+ , convierte la forma básica del indicador a su forma ácida, lo que provoca un cambio de color (Karaca et al., 2023).

En el caso de la **Figura 12**, se demuestra que existe una buena correlación positiva entre el cambio de color y la concentración de dióxido de carbono. Esta correlación permite predecir la concentración de CO_2 en el interior del envase a través del cambio de color, de forma cualitativa o semicuantitativa. Por lo tanto, la biopelícula es útil para determinar la composición gaseosa de productos envasados en atmósferas modificadas, y para predecir la calidad del producto si está en buenas condiciones para el consumo.

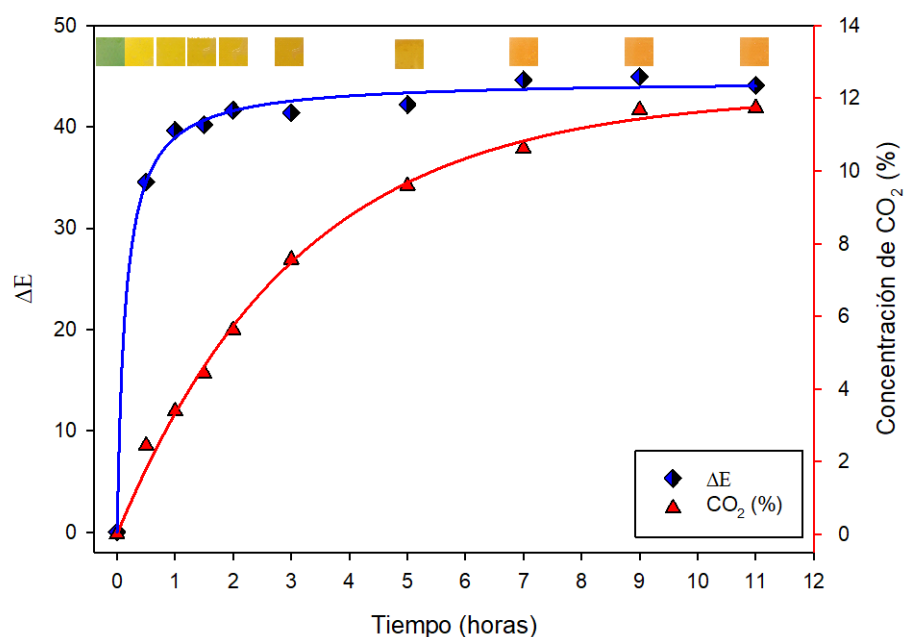


Figura 11. Cambios de color y concentración de dióxido de carbono durante el almacenamiento del fruto de aguacate 'Hass' a 24 °C.

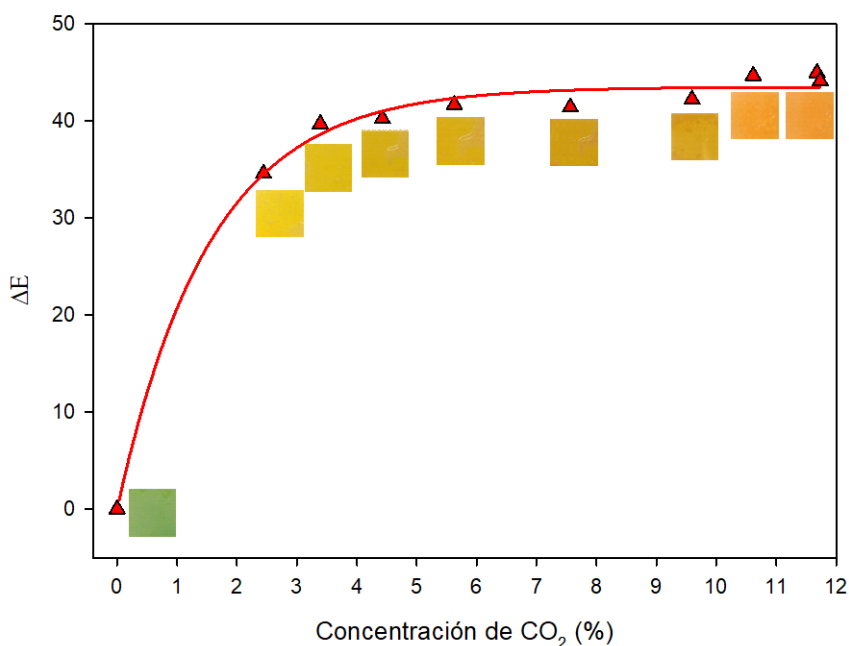


Figura 12. Correlación de los valores de la ΔE y las concentraciones de CO₂.

3.3.5. Resultado de la validación de la biopelícula indicadora en condiciones reales de envasado con microperforaciones

En la **Figura 13**, se muestran los cambios de la concentración de CO₂ en el espacio de cabeza y los valores de la ΔE durante el almacenamiento, bajo diferentes niveles de microperforación. En este caso, se observó un incremento del CO₂ con un comportamiento logarítmico, caracterizado por un aumento rápido al inicio que tendió a estabilizarse a partir de las seis horas, específicamente a las que tienen 10 y 20 microperforaciones. A diferencia de los envases sin perforaciones se presentó un aumento progresivo, alcanzando un valor máximo de 13.5 % de CO₂ a las 21 h. A pesar de los distintos grados de microperforaciones, las concentraciones de CO₂ fueron similares entre las unidades experimentales, con un incremento durante el almacenamiento no mayor al 5 % después de los primeros 3 h.

Respecto al cambio de color, las biopelículas indicadoras exhibieron un cambio de color en tres fases bien definidas, mostrando respuestas similares entre las

distintas unidades experimentales según los valores de Hue y ΔE , aunque con diferentes intensidades cromáticas. Al inicio del almacenamiento, las biopelículas presentaron un color verde con un valor de Hue de 133.49. Posteriormente, exhibieron una transición de color hacia un tono amarillo fuerte brillante durante las primeras tres horas (Hue = 81.8–85.81). Después, a las seis horas, el color cambio a un tono amarillo naranja (Hue = 77.57–74.55), el cual se mantuvo estable hasta las 21 horas. Además, se observó una disminución en la intensidad del cambio de color, lo que podría atribuirse a la migración de los indicadores ocasionado por la alta humedad relativa dentro del envase.

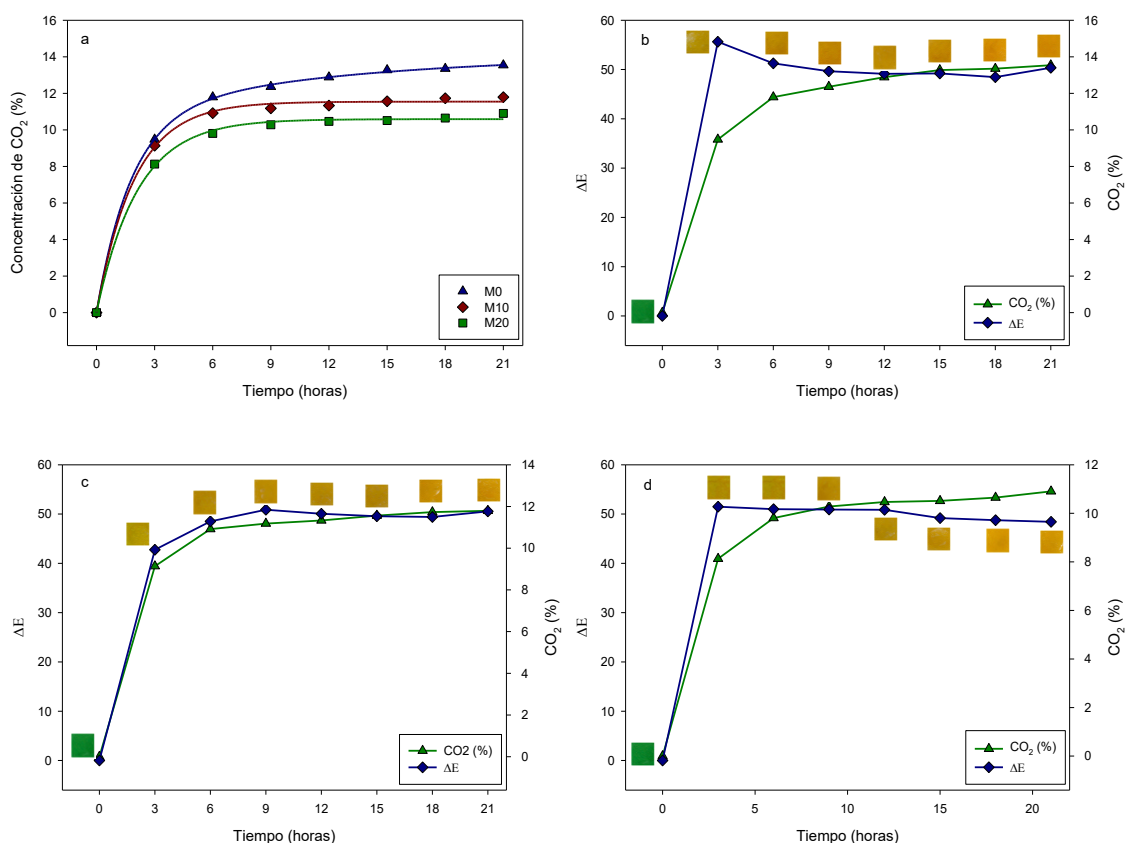


Figura 13. Cambio en la concentración de CO₂ y ΔE durante el almacenamiento de frutos de aguacate 'Hass' a 24 °C, con diferentes niveles de microperforación; concentraciones de CO₂ (a), sin perforación (b), con 10 microperforaciones (c), y con 20 microperforaciones (d). Los valores corresponden al promedio de tres repeticiones.

3.3.6. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

La estructura química de las biopelículas indicadoras se analizó mediante FTIR con el fin de identificar los cambios en los grupos funciones de las biopelículas

durante el proceso de almacenamiento. Los espectros FTIR de las biopelículas indicadoras antes y después del almacenamiento se presentan en la **Figura 14**. Antes del almacenamiento, la biopelícula que contenía indicadores ácido-base (BP), exhibió un pico amplio a 3272 cm^{-1} , atribuido a la vibración de estiramiento del grupo OH, mientras que las bandas de absorción observadas a 2930 cm^{-1} y 2878 cm^{-1} , se debían a las vibraciones de estiramiento de CH de los grupos metileno (asimétricos y simétricos de CH_2) de CMC, típicas de los polisacáridos (Ezati et al., 2021; H. Zhao et al., 2025).

Los picos de absorción a 1590 cm^{-1} , corresponden a las vibraciones de estiramiento asimétricas de los grupos carboxilato ($-\text{COO}^-$), es decir, la forma ionizada de los grupos carboxílicos (COOH) presentes en la muestra (Nandiyanto et al., 2022; Oun et al., 2024; Wandee et al., 2019). Esta ionización se debió a la adición de NaOH, lo cual favoreció la desprotonación de los grupos funcionales presentes en las moléculas de la biopelícula (Boccalon et al., 2022). Además, la banda observada en 1590 cm^{-1} puede atribuirse también a las vibraciones de estiramiento del anillo aromático (X. Zhang et al., 2019) presentes en las estructuras moleculares de los indicadores ácido-base utilizados, como el azul de bromotimol y el azul de timol. Estas moléculas contienen anillos bencénicos cuyas vibraciones características pueden encontrarse en el rango de 1495 a 1615 cm^{-1} , según lo reportado por (Nandiyanto et al., 2022). La banda observada a 1025 cm^{-1} , corresponde a la vibración de estiramiento del enlace C-O de grupos hidroxilos presentes en la CMC y el glicerol (Jia et al., 2025).

Después del almacenamiento, las biopelículas BP-PF- CO_2 y BP- CO_2 mostraron espectros similares con la biopelícula de control (BP), caracterizado por la presencia de una banda en 3257 cm^{-1} y 3268 cm^{-1} (grupo OH), así como pequeños picos en 2930 cm^{-1} y 2878 (grupo CH_2) con diferentes grados de intensidad. Sin embargo, en el pico de 1590 cm^{-1} , correspondiente a los grupos COO^- , presentó un ligero desplazamiento hacia 1637 cm^{-1} . Este desplazamiento podría estar asociado a la formación de enlaces de hidrógeno entre los grupos

carboxilato (Yekta et al., 2023), posiblemente por la absorción de agua y CO₂. Además, la protonación o desprotonación parcial de los grupos COO⁻ puede modificar el patrón vibracional, generando bandas tanto simétricas como asimétricas en esta región del espectro (Boccalon et al., 2022; Rong et al., 2024; Wandee et al., 2019).

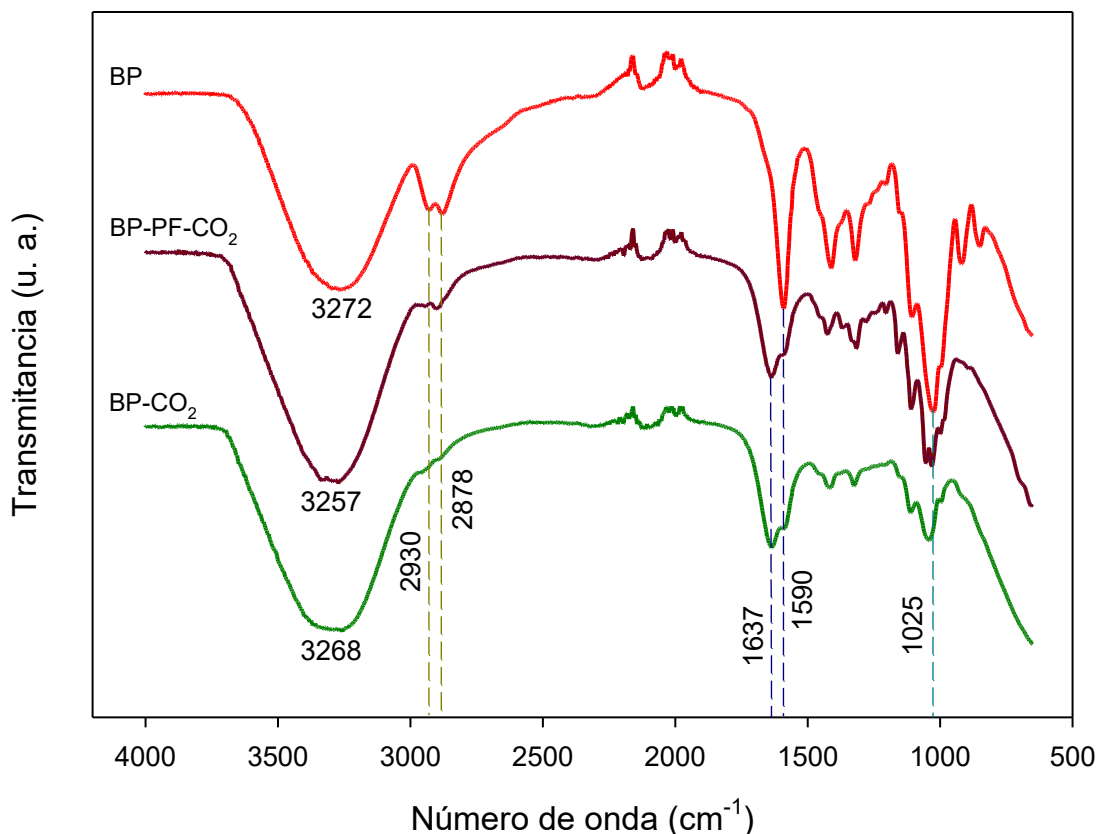


Figura 14. Los espectros FTIR de biopelículas que contienen indicadores ácido-base (BP); biopelículas después del almacenamiento con papel filtro (BP-PF-CO₂) y biopelículas después del almacenamiento sin papel filtro (BP-CO₂).

3.4. Conclusión

De acuerdo con los resultados, los indicadores ácido-base exhibieron cambios de color inducidos por la presencia de CO₂, tanto en la solución como en las biopelículas. Además, durante el almacenamiento con frutos, se observó una transición cromática de verde a naranja, lo que demuestra su utilidad para monitorear las concentraciones de CO₂ en el espacio de cabeza de los envases.

Sim embargo, las biopelículas aun presenta limitaciones, ya que detecta bajas contracciones de CO₂, debido a que el cambio de color ocurre de forma muy rápido al inicio, alcanzando rápido máxima capacidad de respuesta, por lo que posteriormente no se observan cambios de color perceptibles a simple. Por ello, será necesario incrementar el pH para ampliar su rango de detección y mejorar su sensibilidad.

3.5. Literatura citada

- Beshai, H., Sarabha, G. K., Rathi, P., Alam, A. U., & Jamal Deen, M. (2020). Freshness monitoring of packaged vegetables. *Applied Sciences*, 10(21), 7937. <https://doi.org/10.3390/APP10217937>
- Boccalon, E., Viscusi, G., Lamberti, E., Fancello, F., Zara, S., Sassi, P., Marinozzi, M., Nocchetti, M., & Gorrasi, G. (2022). Composite films containing red onion skin extract as intelligent pH indicators for food packaging. *Applied Surface Science*, 593, 153319. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2022.153319>
- Chen, B., Zhang, M., Chen, H., Mujumdar, A. S., & Guo, Z. (2023). Progress in smart labels for rapid quality detection of fruit and vegetables: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 198, 112261. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2023.112261>
- Chen, H., Zhang, M., Bhandari, B., & Guo, Z. (2018). Applicability of a colorimetric indicator label for monitoring freshness of fresh-cut green bell pepper. *Postharvest Biology and Technology*, 140, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.02.011>
- Chen, H., Zhang, M., Bhandari, B., & Yang, C. (2019). Development of a novel colorimetric food package label for monitoring lean pork freshness. *LWT*, 99, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.09.048>
- Chen, M. Miao, Li, B. Hang, Wu, Y., He, Z., Xiong, X. Bing, Han, W. Dong, Liu, B., & Yang, S. Bin. (2023). Intelligent biogenic pH-sensitive and amine-responsive color-changing label for real-time monitoring of shrimp freshness. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(15), 7798–7808. <https://doi.org/10.1002/JSFA.12856>
- Espinosa-Cruz, C. C., Valle-Guadarrama, S., Ybarra-Moncada, Ma. C., & Martínez-Damián, M. T. (2014). Comportamiento postcosecha de frutos de aguacate ‘Hass’ afectado por temperatura y atmósfera modificada con microperforado. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37(3), 235. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v37n3/v37n3a9.pdf>
- Ezati, P., Priyadarshi, R., Bang, Y. J., & Rhim, J. W. (2021). CMC and CNF-based intelligent pH-responsive color indicator films integrated with shikonin to

- monitor fish freshness. *Food Control*, 126, 108046. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2021.108046>
- Feng, T., Chen, H., & Zhang, M. (2023). Applicability and freshness control of pH-sensitive intelligent label in cool chain transportation of vegetables. *Foods*, 12(18), 3489. <https://doi.org/10.3390/FOODS12183489>
- García-Cruz, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y., & Luna-Morales, C. del C. (2016). Postharvest quality, soluble phenols, betalains content, and antioxidant activity of *Stenocereus pruinosus* and *Stenocereus stellatus* fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.07.004>
- Jia, H., Wu, C., Huang, M., & Zhu, Q. (2025). An intelligent fruit freshness monitoring system using hydrophobic indicator labels based on methylcellulose, k-carrageenan, and sodium tripolyphosphate, combined with deep learning. *International Journal of Biological Macromolecules*, 291, 140001. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.140001>
- Karaca, I. M., Haskaraca, G., Ayhan, Z., & Gültekin, E. (2023). Development of real time-pH sensitive intelligent indicators for monitoring chicken breast freshness/spoilage using real packaging practices. *Food Research International*, 173, 113261. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113261>
- Lee, K., Baek, S., Kim, D., & Seo, J. (2019). A freshness indicator for monitoring chicken-breast spoilage using a Tyvek® sheet and RGB color analysis. *Food Packaging and Shelf Life*, 19, 40–46. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2018.11.016>
- Li, Y., Wu, Y., & Li, C. (2024). Development of CO₂-sensitive antimicrobial bilayer films based on gellan gum and sodium alginate/sodium carboxymethyl cellulose and its application in strawberries. *International Journal of Biological Macromolecules*, 264, 130572. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.130572>
- Lin, Y., Lin, H., Chen, Y., Wang, H., Lin, M., Ritenour, M. A., & Lin, Y. (2020). The role of ROS-induced change of respiratory metabolism in pulp breakdown development of longan fruit during storage. *Food Chemistry*, 305, 125439. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.125439>
- Magnaghi, L. R., Alberti, G., Capone, F., Zanoni, C., Mannucci, B., Quadrelli, P., & Biesuz, R. (2020). Development of a dye-based device to assess the poultry meat spoilage. Part II: Array on act. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(45), 12710. <https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.0C03771>
- Nandiyanto, A. B. D., Ragadhita, R., & Fiandini, M. (2022). Interpretation of Fourier transform infrared spectra (FTIR): A practical approach in the polymer/plastic thermal decomposition. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 8(1), 113–126. <https://doi.org/10.17509/ijost.v8i1.53297>
- Nopwinyuwong, A., Trevanich, S., & Suppakul, P. (2010). Development of a novel colorimetric indicator label for monitoring freshness of intermediate-moisture

- p dessert spoilage.
- Talanta*
- , 81(3), 1126–1132.
-
- <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.02.008>
- Obaidi, A. Al, Karaca, I. M., Ayhan, Z., Haskaraca, G., & Gultekin, E. (2022). Fabrication and validation of CO₂-sensitive indicator to monitor the freshness of poultry meat. *Food Packaging and Shelf Life*, 34, 100930. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100930>
- Oun, A. A., Roy, S., Hong, S. J., Shin, G. H., Yoo, S. R., & Kim, J. T. (2024). Development of smart colorimetric indicators for tracking kimchi freshness by loading aronia extract in agar, κ-carrageenan, and cellulose nanofiber films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 270, 132343. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.132343>
- Panwar, A., Kumar, S., Dhiman, A., Kumar, V., Gupta, D., & Sharma, A. (2024). pH sensitive indicator film based intelligent packaging systems of perishables: Developments and challenges of last decade. *Microchemical Journal*, 207, 111732. <https://doi.org/10.1016/J.MICROC.2024.111732>
- Ran, R., Wang, L., Su, Y., He, S., He, B., Li, C., Wang, C., Liu, Y., & Chen, S. (2021). Preparation of pH-indicator films based on soy protein isolate/bromothymol blue and methyl red for monitoring fresh-cut apple freshness. *Journal of Food Science*, 86(10), 4594–4610. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15884>
- Rong, L., Zhang, T., Ma, Y., Wang, T., Liu, Y., & Wu, Z. (2023). An intelligent label using sodium carboxymethyl cellulose and carrageenan for monitoring the freshness of fresh-cut papaya. *Food Control*, 145, 109420. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109420>
- Rong, L., Zhao, Y., Gao, S., Ma, J., Zhang, S., & Wu, Z. (2024). Colorimetric gel labels for the non-destructive freshness monitoring of fresh-cut papaya. *Food Hydrocolloids*, 149, 109581. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2023.109581>
- Rukchon, C., Nopwinyuwong, A., Trevanich, S., Jinkarn, T., & Suppakul, P. (2014). Development of a food spoilage indicator for monitoring freshness of skinless chicken breast. *Talanta*, 130, 547–554. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.07.048>
- Tang, T., Zhang, M., Jia, H., Bhandari, B., & Guo, Z. (2025). Intelligent monitoring of fruit and vegetable freshness in supply chain based on 3D printing and lightweight deep convolutional neural networks (DCNN). *Food Chemistry*, 480, 143886. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2025.143886>
- Vargas-Torrico, M. F., Aguilar-Méndez, M. A., Ronquillo-de Jesús, E., Jaime-Fonseca, M. R., & von Borries-Medrano, E. (2024). Preparation and characterization of gelatin-carboxymethylcellulose active film incorporated with pomegranate (*Punica granatum* L.) peel extract for the preservation of raspberry fruit. *Food Hydrocolloids*, 150, 109677. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2023.109677>

- Wandee, Y., Uttapap, D., & Mischnick, P. (2019). Yield and structural composition of pomelo peel pectins extracted under acidic and alkaline conditions. *Food Hydrocolloids*, 87, 237–244. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2018.08.017>
- Wang, C., Yusufu, D., & Mills, A. (2019). A smart adhesive “consume within” (CW) indicator for food packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 22, 100395. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2019.100395>
- Yekta, R., Abedi-Firoozjah, R., Azimi Salim, S., Khezerlou, A., Abdolmaleki, K., Yekta, R., Abedi-Firoozjah, R., Azimi Salim, S., Khezerlou, A., & Abdolmaleki, K. (2023). Application of cellulose and cellulose derivatives in smart/intelligent bio-based food packaging. *Cellulose* 2023 30:16, 30(16), 9925–9953. <https://doi.org/10.1007/S10570-023-05520-1>
- Zhai, X., Xue, Y., Sun, Y., Ma, X., Ban, W., Marappan, G., Tahir, H. E., Huang, X., Wu, K., Chen, Z., Zou, W., Liu, B., Zhang, L., Yang, Z., & Katona, J. (2025). Colorimetric food freshness indicators for intelligent packaging: progress, shortcomings, and promising solutions. *Foods*, 14(16), 2813. <https://doi.org/10.3390/FOODS14162813>
- Zhang, X., Liu, Y., Yong, H., Qin, Y., Liu, J., & Liu, J. (2019). Development of multifunctional food packaging films based on chitosan, TiO₂ nanoparticles and anthocyanin-rich black plum peel extract. *Food Hydrocolloids*, 94, 80–92. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2019.03.009>
- Zhang, Y., & Lim, L. T. (2018). Colorimetric array indicator for NH₃ and CO₂ detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 255, 3216–3226. <https://doi.org/10.1016/J.SNB.2017.09.148>
- Zhao, H., Liu, W., Min, C., Qi, Y., Chen, X., & Zhang, H. (2025). pH-responsive color indicator film based on gelatin/chitosan cross-linking with anthocyanin-Fe²⁺ chelate for pork freshness monitoring. *Food Hydrocolloids*, 162, 110895. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2024.110895>

4. ETIQUETAS SENSIBLES AL CO₂ PARA EL MONITOREO DEL COMPORTAMIENTO RESPIRATORIO DE FRUTOS DE AGUACATE 'HASS'

Resumen

El metabolismo respiratorio de las frutas está directamente relacionado con la senescencia y la vida útil, por lo que el monitoreo de CO₂ representa un indicador clave de la actividad respiratoria, la maduración y el deterioro del producto durante el envasado en atmósfera modificada (EAM). No obstante, el uso de biopelículas indicadoras en el (EAM) presenta limitaciones en cuanto a su seguridad y aplicabilidad en el envasado, debido a su baja resistencia frente a los factores ambientales del entorno circundante. Por ello, el objetivo de este capítulo fue desarrollar etiquetas indicadoras en tres capas sensibles al CO₂, compuestas por una capa interna de Tyvek, una lámina porosa permeable a los gases; una capa intermedia a base de carboximetilcelulosa que cambia de color, desarrollada con dos grupos de indicadores ácido-base: (rojo de metilo (RM), azul de bromotimol (ABT) y azul de timol (AT)) y (RM y ABT); y una capa externa de LPDE que permite visualizar los cambios de color. Para evaluar su funcionamiento, se realizaron simulaciones con concentraciones estándar de CO₂ y posteriormente, una validación en envases reales con frutos de aguacate 'Hass' bajo condiciones de atmósfera modificada a 24° C durante 20 h. Los resultados indicaron que las etiquetas con dos indicadores mostraron una capacidad efectiva para monitorear las concentraciones de CO₂ tanto en la simulación y validación real, mostrando una alta correlación entre el incremento de CO₂ y el cambio de color, mientras que las etiquetas con tres indicadores no presentaron una correlación significativa entre ambos parámetros. Asimismo, se desarrollaron espectros mediante FTIR, los cuales confirmaron los cambios estructurales de las etiquetas durante el almacenamiento, evidenciando la reacción y el cambio de color. Por lo tanto, las etiquetas con dos indicadores tienen potencial para la detección de CO₂ en condiciones reales de envasado.

Palabras clave: envases inteligentes, biopolímeros, indicadores ácido-base, dióxido de carbono, pH.

Tesis de Maestría en Ciencias, Maestría en Ciencia y Tecnología Agroalimentaria, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Luciano López Gómez

Director de tesis: Salvador Valle Guadarrama, Dr.

SENSIBLE TO CO₂ LABELS FOR THE MONITORING OF RESPIRATORY BEHAVIOR OF 'HASS' AVOCADO FRUITS

Abstract

The respiratory metabolism of fruit is directly related to senescence and shelf life, making CO₂ monitoring a key indicator of respiratory activity, ripening, and product deterioration during modified atmosphere packaging (MAP). However, the use of biofilms with indicators in MAP has limitations in terms of safety and applicability in packaging due to their low resistance to environmental factors. The objective of this stager was to develop three-layer CO₂-sensitive indicator labels. One layer consisted of an inner layer of Tyvek, a porous film permeable to gases. Another was a color-changing intermediate layer made with carboxymethylcellulose, incorporated with two groups of acid-base indicators: methyl red (MR), bromothymol blue (BTB), and thymol blue (TB) and (MR and BTB). The third was an outer layer of LPDE that allowed visualization of the color changes. To evaluate the performance, simulations were conducted using standard CO₂ concentrations, followed by validation on real packaging containing 'Hass' avocados under modified atmosphere conditions at 24°C for 20 h. Results indicated that the labels with two indicators showed an effective capacity to monitor CO₂ concentrations in both the simulation and actual validation, demonstrating a high correlation between the increase in CO₂ and the color change, while the labels with three indicators did not show a significant correlation between these two parameters. Furthermore, FTIR spectra were performed and confirmed the structural changes in the labels during storage, evidencing the reaction and the color change. Therefore, the labels with two indicators have potential for CO₂ detection under real packaging conditions.

Key words: intelligent packaging, acid-base indicators, carbon dioxide, biopolymers, pH.

Master of Science Thesis, Graduate program in Agri-Food Science and Technology, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Luciano López Gómez

Thesis advisor: Salvador Valle Guadarrama. Dr.

4.1. Introducción

Los productos hortícolas son organismos vivos que mantienen sus procesos fisiológicos y bioquímicos después de la cosecha (Alam et al., 2021; Dwibedi et al., 2024; Zhai et al., 2025). Durante el almacenamiento, absorben oxígeno y liberan dióxido de carbono como parte de su metabolismo respiratorio (Alam et al., 2021). A medida que los frutos maduran, su tasa respiratoria aumenta y en consecuencia la producción de CO₂ (Tang et al., 2025). Estos procesos están influenciados por diversos factores como la temperatura, la humedad, la composición de los gases, los cuales afectan la calidad y acortan la vida útil del producto (Akhila et al., 2024; Alam et al., 2021; Panou et al., 2025). Por ello, el control de la respiración postcosecha es una estrategia clave para reducir la pérdida y mantener la calidad (Fang & Wakisaka, 2021). Los métodos de conservación tradicionales, como la refrigeración, el envasado en atmósfera modificada y los conservantes químicos resultan efectivos para extender la vida útil de las frutas y verduras, pero presentan limitaciones (Du et al., 2025). En particular, el envasado en atmósfera modificada ralentiza los procesos fisiológicos y bioquímicos y retrasa la senescencia; sin embargo, si no se establece una atmósfera adecuada, puede inducir la fermentación lo que reduce la vida útil del producto (Banda et al., 2015), ya que la composición gaseosa dentro del envase depende de la interacción entre la respiración del producto y la permeabilidad del material del envase (Mahajan & Lee, 2023). Además, la disminución de la calidad de los productos también se refleja en la tasa de respiración (Luo et al., 2022b).

En este sentido, el desarrollo de tecnología postcosechas rentables para reducir el deterioro de las frutas y verduras es de suma importancia (He et al., 2023). El desarrollo reciente de tecnologías de envasado inteligente ofrece nuevas soluciones para la conservación. El envasado inteligente permite el monitoreo y la regulación en tiempo real del entorno de almacenamiento mediante la integración de sensores, membranas funcionales y sistemas de control de gases, lo que contribuye a extender la frescura, reducir el desperdicio y mejorar la

eficiencia de la cadena de suministro (Du et al., 2025). Particularmente, los indicadores colorimétricos han demostrado ser eficaces para monitorear la frescura al detectar compuestos relacionados con el deterioro, como el etileno, los ácidos orgánicos y cambios de pH, proporcionando una evaluación visual, no destructiva y de bajo costo de la calidad y madurez del producto. En frutas y hortalizas, el monitoreo suele enfocarse en CO₂, etileno, aldehídos y variaciones de pH, ya que estos compuestos actúan como indicadores claves de la actividad respiratoria, la maduración y el deterioro microbiano (Zhai et al., 2025). En general, los indicadores colorimétricos se diseñan en forma de etiquetas con una estructura de tres capas: una capa interna semipermeable que facilita la difusión de metabolitos, una capa que cambia de color y una capa protectora externa. La capa interna es fundamental para garantizar un rendimiento óptimo y proteger el producto alimenticio, ya que permite la penetración controlada de los metabolitos generados por el deterioro y evita la migración de los colorantes de la capa que cambia de color (E. J. Lee & Shin, 2019).

En este contexto, la presente investigación se centró en desarrollar y validar etiquetas indicadoras sensible al CO₂, basadas en indicadores ácido-base (rojo de metilo, azul de bromotimol y azul de timol) incorporados en una matriz de carboximetilcelulosa y una lámina Tyvek® 1073D como capa interna, con el objetivo de monitorear en tiempo real el comportamiento respiratorio de frutos de aguacate 'Hass' envasados en atmósfera modificada y evaluar la correlación entre los cambios de color y la concentración de CO₂ para determinar la efectividad de la etiqueta indicadora.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Materiales

Para la preparación de la etiqueta indicadora, la carboximetilcelulosa (CMC) utilizada como matriz polimérica se adquirió de Laboratorios Laitz; el rojo de metilo (RM), el azul de bromotimol (ABT) y el azul de timol (AT), se adquirieron de Meyer; el glicerol se obtuvo de Hycel; el etanol, el NaOH y el HCl fueron

reactivos de grado analítico. La película de polietileno de baja densidad (LDPE, 30 μm de espesor) empleada como capa externa, se adquirió en un supermercado local, mientras que la lámina Tyvek® 1073D (160 μm de espesor), utilizada como para capa interna, se adquirió de DuPont (EE. UU). Los frutos de aguacate 'Hass' como modelo de trabajo fueron adquiridas en un supermercado local. Todos los materiales o reactivos fueron adquiridos en México a menos que diga lo contrario.

4.2.2. Desarrollo de las etiquetas indicadoras sensible al pH

Se desarrollaron etiquetas colorimétricas específicamente para monitorear el metabolismo respiratorio en frutas bajo condiciones de almacenamiento en atmósfera modificada. La elección de los indicadores ácido-base (RM, ABT y AT) y el método de preparación se basaron en diversos estudios previos indicados por (H. Chen et al., 2018; K. Lee, Baek, et al., 2019; Nopwinyuwong et al., 2010; Rukchon et al., 2014; Y. Zhang & Lim, 2018), quienes han desarrollado indicadores de frescura para diversos alimentos. Para ello, se preparó una solución madre de RM, ABT y AT en etanol al 0.1 %. Con estas soluciones se formaron 2 grupos, una mezcla que contenía dos indicadores (RM y ABT) en una proporción 3:2 y otra que contenía tres indicadores (RM, ABT y AT) en una proporción 1:1:1 para obtener una solución mixta con una amplia gama de colores en diferentes niveles de pH. En el desarrollo de las etiquetas indicadoras, primero se disolvieron glicerol al 0.5 % (p/v) y CMC al 1.5 % (p/v) en 100 mL de agua destilada mediante agitación magnética. Luego, se agregaron 5 mL de la solución indicadora mixta. El proceso de agitación magnética se llevó a cabo a una velocidad baja durante 2 h o hasta obtener una solución homogénea. La solución final que contiene dos indicadores se ajustó a un pH de 10.4 y con tres indicadores se ajustó a pH 10.6 mediante la adición de NaOH al 0.1 N. Las soluciones indicadoras se vaciaron 25 g en cajas de Petri (d=90 mm) y se secó a 45 °C durante 12 h o hasta su secado. Después de obtener la biopelícula indicadora se cortó en círculos de 1.5 cm de diámetro mediante una perforadora manual, para su posterior laminación con el propósito de evitar la degradación de

la matriz polimérica y la migración de los colorantes. A continuación, las películas plásticas del LDPE y la lámina Tyvek se cortaron en tiras de 2.5 cm de ancho. Las biopelículas indicadoras circulares se colocaron sobre la superficie del LDPE, que fueron recubiertas con la lámina Tyvek y se sellaron térmicamente mediante una maquina selladora manual por impulso (Modelo FS-200, Yuguo Home), operada a una temperatura de escala de 2. Una vez terminado el proceso de laminación se cortaron en cuadros de 2.5 x 2.5 cm. El proceso de elaboración de la etiqueta indicadora se observa en la **Figura 15**.

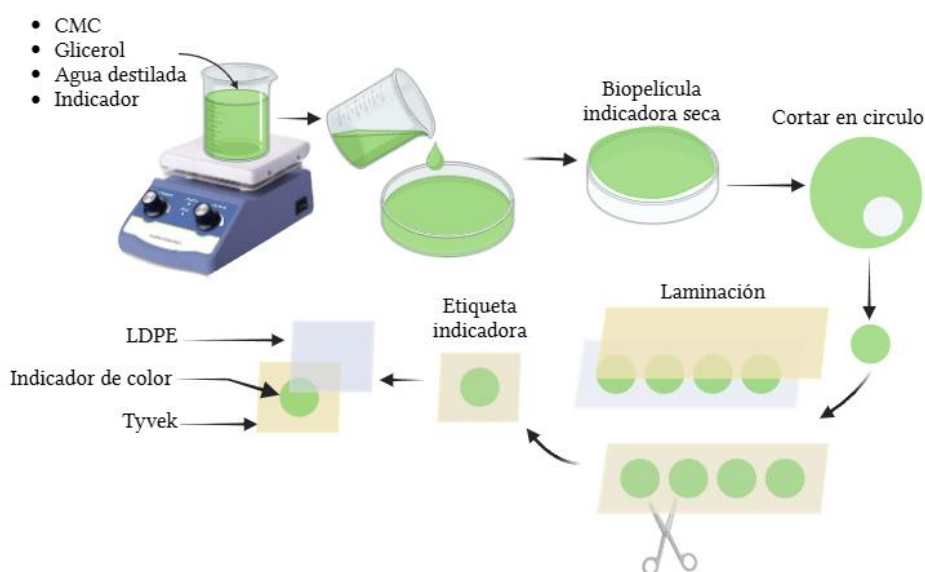


Figura 15. Proceso de fabricación de la etiqueta indicadora.

4.2.3. Ensayos preliminares

La capacidad de coloración de los indicadores ácido-base depende del pH, por lo que las respuestas cromáticas de las etiquetas dependen del tipo de colorantes utilizados. Además, la elección de los colorantes depende de los compuestos o gases que se vayan a monitorizar (Feng et al., 2023; Obaidi et al., 2022). Por lo tanto, en este estudio se determinó la sensibilidad y el cambio de color o las variaciones cromáticas de las etiquetas indicadoras en función del pH, por lo que se desarrollaron etiquetas indicadoras ajustadas en diferentes niveles de pH (9, 8 y 6) y se colocaron en el espacio de cabeza de un envase que contiene frutos

de aguacates y se observó el cambio de color durante el tiempo de almacenamiento (5 d).

Además, se determinó la concentración ideal del colorante, utilizando como base el grupo de indicador que contiene tres indicadores. Para llevar a cabo este procedimiento, se prepararon las etiquetas indicadoras siguiendo el mismo procedimiento descrito en la sección 4.2.2, pero añadiendo 5, 10 y 20 mL de solución indicadora que contenía tres indicadores. Las soluciones fueron ajustados a pH 9, ya que en los resultados anteriores fue donde se observó un cambio de color más pronunciado. Después de la obtención de las etiquetas, se colocaron en tubos Vacutainer® de 11 mL. A continuación, se inyectaron en los tubos diferentes concentraciones de CO₂ (0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 y 24 % (v/v)) de alta pureza (0.99 %) utilizando una jeringa de insulina y se almacenaron a 24 °C.

4.2.4. Determinación de espesor, propiedades mecánicas y contenido de humedad

El grosor de la etiqueta se determinó en seis puntos aleatorios mediante un micrómetro digital y se obtuvo el valor promedio en mm. Las propiedades mecánicas de las etiquetas se determinaron utilizando un analizador de textura (TA-XT2i, Stable Micro Systems, UK). Para ello, se prepararon probetas rectangulares de 1 cm x 5 cm, y la velocidad de ensayo se estableció en 3 mm/s, con una longitud inicial de ensayo de 30 mm entre mordazas. Durante el proceso de estiramiento se registraron curvas de tensión-deformación, de las cuales se derivaron datos mecánicos (Jia et al., 2025). La resistencia a la tracción (TS) y el alargamiento a la rotura (EB) se calcularon de la siguiente forma (Rong et al., 2023):

$$TS(MPa) = \frac{F}{W \times D} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$EB(\%) = \frac{L}{L_0} \times 100 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde F es la fuerza de tracción máxima (N), W es el ancho de la probeta (mm) y D es el grosor de la probeta (mm), L_0 es la longitud inicial de la probeta entre mordazas (mm) y L es la longitud final de la probeta al romperse (mm).

El contenido de humedad de las etiquetas se determinó utilizando un analizador de humedad (MB-45, Ohaus, USA). Para ello, se colocaron 0.8 g de muestra en el plato de aluminio y se secó a 100° C durante 10 min. El equipo registró la pérdida de peso y el contenido de humedad (%). El análisis se realizó por triplicado.

4.2.5. Evaluación del cambio de color de la etiqueta indicadora en respuesta a diferentes concentraciones de CO₂

Para determinar el perfil del cambio de color de las etiquetas indicadoras y correlacionarlo con las concentraciones de CO₂, se prepararon etiquetas indicadoras en diferentes niveles de pH superior a 9. Posteriormente se evaluaron los cambios de colores a partir de soluciones estándar de CO₂. Para ello, las etiquetas obtenidas se colocaron en viales de 9 mL. Después de sellarlos herméticamente, se les inyectaron diferentes concentraciones de CO₂ de alta pureza (99.9 %) utilizando una jeringa de insulina. Para las etiquetas que contenían dos indicadores, se inyectaron concentraciones de CO₂ de 0, 3, 6, 9, 12, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 % (v/v), mientras que para las etiquetas con tres indicadores se aplicaron 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 % (v/v). A continuación, los viales se almacenaron a 24 °C durante 4 h. Posteriormente, los cambios de color se determinaron mediante un colorímetro y las imágenes de las etiquetas se capturaron con la cámara de un teléfono en un ambiente bien iluminado. La evaluación del cambio de color de las etiquetas se realizó por triplicado.

4.2.6. Validación de la etiqueta indicadora en condiciones reales de envasado

Para evaluar la capacidad de las etiquetas indicadoras desarrolladas específicamente para la detección de CO₂, se realizaron experimentos bajo

condiciones reales de almacenamiento. Para ello, se colocaron 533.4 g de frutos de aguacate 'Hass' (en madurez de consumo) en bolsas de polietileno de baja densidad (26.8 cm x 27.3 cm) con diferentes niveles de micropeforaciones de 200 μm : bolsas sin perforaciones (M0) y bolsas con 10 (M10) y 20 (M20) micropeforaciones. El propósito de las micropeforaciones fue para modificar la tasa de intercambio de los gases dentro del envase, para generar diferentes niveles de concentraciones de CO_2 en el espacio de cabeza, como resultado de la respiración del producto. Por lo tanto, las etiquetas indicadoras se colocaron en la parte superior interna de cada bolsa sin entrar en contacto con el producto. Posteriormente, las bolsas se cerraron y se almacenaron a 24 °C durante 20 horas. Para la determinación del cambio de color de las etiquetas durante el almacenamiento del producto, se realizó con un colorímetro durante los primeros 2 h y posteriormente a cada 4 h. Asimismo, para el muestreo de CO_2 se colocaron previamente en el interior de cada bolsa tubos Vacutainer® de 11 mL con sus respectivos tapones. Estos tubos fueron cerrados de forma secuencial a intervalos de 2 y 4 h durante 20 h, sin abrir las bolsas de plástico.

4.2.7. Análisis de la concentración de CO_2 en el envase

En cuanto al análisis de la concentración de CO_2 en el espacio de cabeza del envase, se determinó por el método descrito por (García-Cruz et al., 2016), tal como se describe en la sección 3.2.7.

4.2.8. Análisis del cambio de color de las etiquetas indicadoras

El cambio de color de las etiquetas, tanto en la evaluación a diferentes concentraciones de CO_2 como en la validación en condiciones reales de envasado, se determinó mediante un colorímetro, como se indica en la sección 3.2.6 y se calculó la diferencia de color total (ΔE) mediante la ecuación 3. Para cada unidad experimental se realizaron tres mediciones en diferentes puntos y se reportó el valor promedio.

4.2.9. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Se realizó un análisis por espectroscopia FTIR de las etiquetas indicadoras para evaluar los cambios estructurales tras el almacenamiento, de acuerdo con lo descrito en la sección 3.2.9.

4.2.10. Análisis estadístico

Los datos del cambio de color de las etiquetas y la concentración de CO₂ durante el almacenamiento se sometieron a análisis de varianza, seguido de las comparaciones múltiples de Tukey ($p < 0.05$) dentro de cada nivel de microperforación, considerando cada nivel como una unidad experimental independiente. Además, la relación entre ΔE y la concentración de CO₂ se evaluó mediante modelos de regresión no lineal utilizando el software Sigma Plot (SPSS, 2000).

4.3. Resultados y discusión

4.3.1. Cambio de color de la etiqueta indicadora durante los ensayos preliminares

La exploración de los cambios de color de las etiquetas indicadoras se determinó mediante ensayos preliminares. Como se muestra en la **Figura 16**, el cambio de color de las etiquetas indicadoras depende del nivel de pH al que están ajustado. Cuando se ajustan a un pH cercano al neutro o ligeramente ácido, el cambio de color ya no es tan significativo, debido a que el cambio se produce de manera rápida, llegando a un punto en el que no ya no se observa cambios de color, a pesar del aumento continuo de las concentraciones de CO₂ en el espacio de cabeza del envase. Por el contrario, la etiqueta ajustada a un pH de 9 mostró un cambio de color más pronunciado, pasando de verde a amarillo verdoso y luego a naranja. Por lo tanto, al desarrollar etiquetas indicadoras es imprescindible ajustar el pH a ácido o alcalino, dependiendo de los compuestos metabólicos del alimento que se requiere monitorear, de modo que se pueda observar una transición de color al reaccionar con el metabolito objetivo. Además, en

investigaciones previas sobre el desarrollo de etiquetas indicadoras para la detección de CO₂, las etiquetas se ajustaron a un pH alcalino para desprotonar los indicadores, haciéndolos sensibles a la detección de CO₂ (Karaca et al., 2023; Obaidi et al., 2022; Y. Zhang & Lim, 2018).

Respecto al efecto de las diferentes concentraciones de colorante, como se muestra en la **Figura 17**, a concentraciones altas se obtienen cambios de color más apagados u oscuros, especialmente cuando las etiquetas se encuentran en su pH inicial, ya que el color verde no es claramente discernible a simple vista. En cambio, en concentraciones bajas se observan colores más vivos, que pueden distinguirse fácilmente las variaciones de color. Con base en estos resultados, durante el desarrollo de la presente investigación se decidió utilizar la concentración de 5 mL (0.05 %), ya que esta permitió una mejor diferenciación visual de las variaciones cromáticas de las etiquetas indicadoras durante la exposición a CO₂.

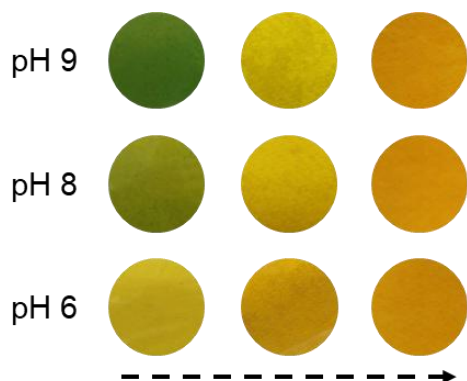


Figura 16. Etiquetas indicadoras sensibles al CO₂ en diferentes niveles de pH que contiene tres indicadores (RM, ABT y AT).

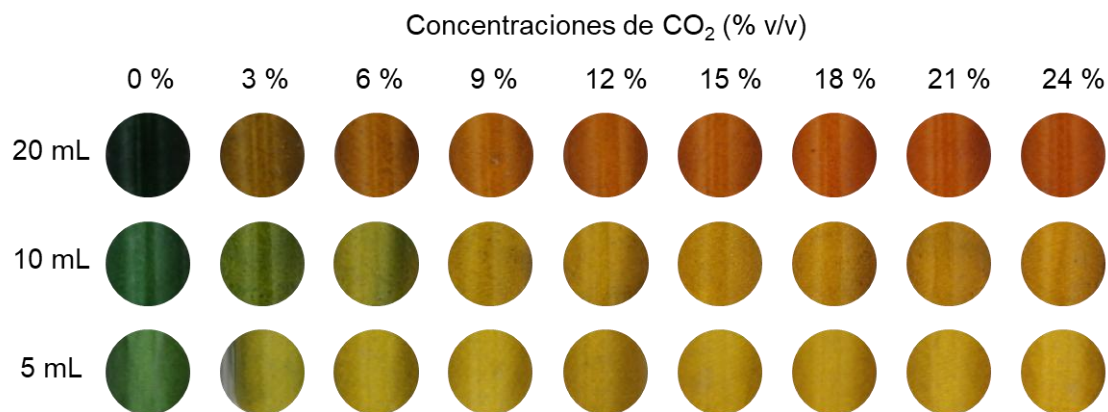


Figura 17. Etiquetas indicadoras sensibles al CO₂, que contiene tres indicadores (RM, ABT y AT) en diferentes concentraciones.

4.3.2. Espesor, propiedades mecánicas y contenido de humedad

El espesor es un parámetro muy importante que influye en las propiedades de barrera y en la resistencia mecánica de las películas (Kaewprachu et al., 2024; L. Liu et al., 2022). Además, las propiedades mecánicas son esenciales para reflejar la capacidad de una película de mantener la integridad estructural durante los procesos de transporte y almacenamiento (Li et al., 2024; Y. Zhao et al., 2025). Por lo tanto, con el propósito de demostrar las propiedades en las etiquetas desarrolladas en esta investigación, se determinaron el espesor, el contenido de humedad y se caracterizaron su resistencia a la tracción (TS) y alargamiento a la rotura (EB), cuyos resultados se presentan en la **Cuadro 3**. Ambas etiquetas presentaron resultados similares, ya que fueron elaboradas bajo las mismas condiciones, con la excepción del tipo de indicador utilizado, el cual no generaron diferencias significativas entre ellos. El espesor obtenido resultó ser mayor con el de las películas convencionales, lo cual se atribuye al uso de macromoléculas naturales como la carboximetilcelulosa (Y. Liu et al., 2022). Además, ambas etiquetas presentaron un contenido de humedad aproximado del 19 %, lo que facilitó la manejabilidad durante el proceso de laminación.

Cuadro 3. Propiedades físicas y mecánicas de las etiquetas desarrollada para la detección de CO₂.

Etiqueta indicadora	Espesor (mm)	Esfuerzo a la tensión (N)	Esfuerzo a la tensión (MPa)	Alargamiento a la rotura (%)	Contenido de humedad (%)
RM-ABT	0.094 ± 0.00a	19.79 ± 1.24a	20.68 ± 1.29a	34 ± 5.25a	19.50 ± 0.71a
RM-ABT-AT	0.095 ± 0.01a	19.98 ± 1.52a	20.20 ± 1.53a	35 ± 6.89a	18.85 ± 0.21a

Los datos representan la media ± desviación estándar.

4.3.3. Cambio de color de las etiquetas indicadoras en respuesta a diferentes concentraciones de CO₂

Durante la determinación del perfil del cambio color en las etiquetas indicadoras a partir de concentraciones conocidas de CO₂, se llevaron a cabo varias pruebas preliminares en las que se ajustaron las etiquetas a diferentes niveles de pH y se inyectaron diferentes concentraciones de CO₂. Con estas pruebas, se determinó que a un pH de 10 o más, puede exhibir una transición de color más amplio debido a la variación de pH. Por ende, en esta investigación se desarrollaron etiquetas indicadoras con un pH aproximadamente a 10.4 para las etiquetas que contiene dos indicadores y 10.6 para los que contiene tres indicadores. A continuación, estas etiquetas indicadoras se utilizaron para inyectar diferentes concentraciones conocidas de CO₂.

Los resultados del perfil de cambio de color de las etiquetas se muestran en la **Figura 18**. Ambas etiquetas exhibieron un cambio de color con el aumento de la concentración de CO₂. El color verde oscuro inicial de las etiquetas con dos indicadores se volvió verde amarillento con una concentración de CO₂ al 3 %, mientras que a 6 % se observó un tono amarillo verdoso oscuro y a 9 %, el color se cambió a amarillo oscuro. Con una concentración de 12 % de CO₂, las etiquetas adquirieron una coloración amarilla puro oscuro, seguido de un amarillo fuerte brillante a 15 % de CO₂. Posteriormente, al alcanzar una concentración de 20 % de CO₂, el tono se volvió hacia un color amarillo anaranjado seguida de un cambio progresivo hasta alcanzar un color anaranjado a 40 % de CO₂. En cambio, las etiquetas con tres indicadores de color verde oscuro, cambio a verde amarillenta con una concentración de CO₂ del 5 %, posteriormente a amarillo

verdoso con 10 %, seguido de un cambio de color gradual hacia amarillo anaranjado a 20 % y finalmente llega a naranja a 40 % de CO₂.

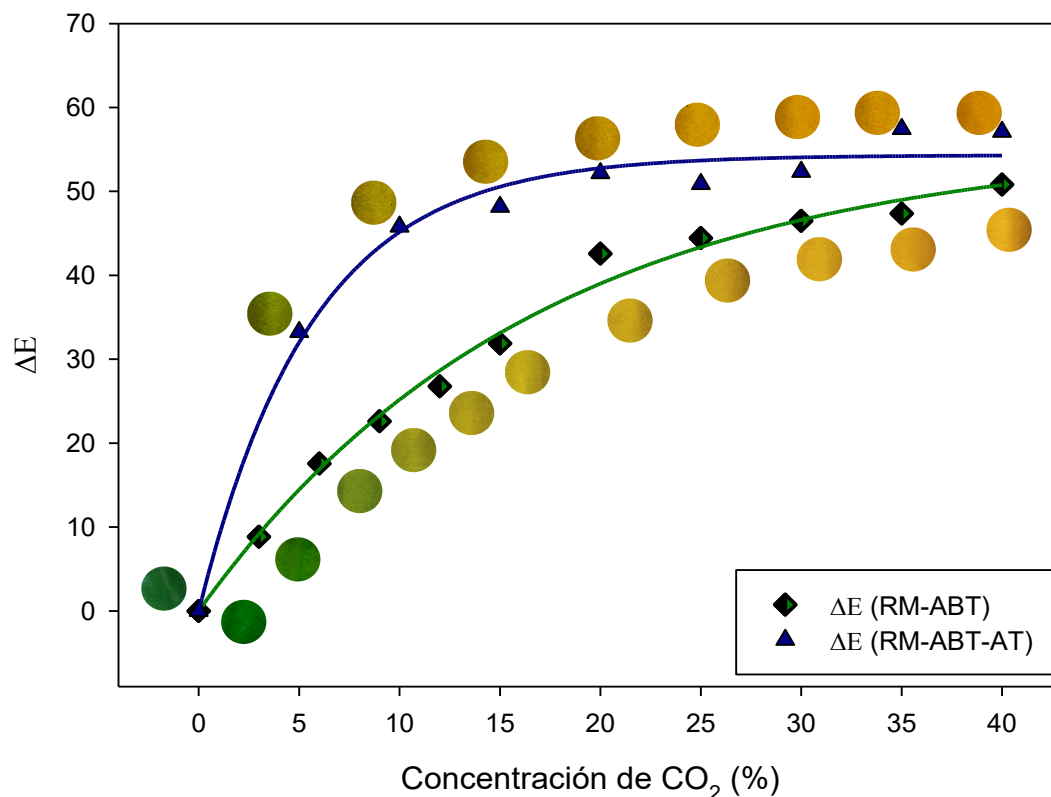


Figura 18. Perfil del cambio de color de las etiquetas indicadoras en diferentes concentraciones de CO₂.

Con respecto a los valores de ΔE , ambas etiquetas exhibieron un cambio de color gradual conforme aumentó la concentración de CO₂, con un comportamiento de tipo logarítmico. Tanto las etiquetas con dos como con tres indicadores se ajustaron adecuadamente a modelos de la forma $\Delta E = y_0 + a(1 - \exp(-b \cdot CO_2))$, con coeficientes de determinación (R^2) de 0.99 y 0.98, respectivamente. Las etiquetas que contenía dos indicadores exhibieron una transición de color de verde oscuro a naranja. El análisis del cambio de color total indicó que en el rango de 0 a 20 % de CO₂, los valores de ΔE fueron superiores a 5, seguidos de un cambio gradual de color con valores $\Delta E \leq 2$, aunque en el rango de 9 a 12 % de CO₂, tuvieron valores de $\Delta E \geq 4$, lo cual es cercano a 5. Estos indicadores presentaron mayor sensibilidad en el rango de 0 a 15 % de CO₂, mostrando

cambios perceptibles a simple vista en intervalos de 3 %, mientras que a concentraciones superiores el cambio de color volvió más gradual, con intervalos de detección de 5 %. En el caso de las etiquetas con tres indicadores, también se observó una transición de color de verde oscuro a naranja oscuro con tonalidades marrones, registrando valores de $\Delta E > 12$ en el rango de 0 a 10 % de CO₂, seguidos de un cambio gradual de color. Sin embargo, estas etiquetas presentaron una menor sensibilidad, con intervalos de detección de 5 % y cambios perceptibles a simple en los rangos de 0 a 10 %, 20 % y 35 % de CO₂. Estos resultados indican que la combinación de dos indicadores genera una respuesta más definida frente a pequeñas variaciones de CO₂, mientras que la incorporación de un tercer indicador amplía el rango de detección, pero con una menor resolución. En general, los valores de ΔE superiores a 5 son perceptibles a simple vista, mientras que valores mayores a 12 indican un espacio de color diferente (H. Chen et al., 2018). Por lo tanto, los cambios de color observados en la etiqueta con dos indicadores en el rango de 0 a 20 % de CO₂, son perceptibles a simple vista, ya que presentan valores de $\Delta E \geq 5$.

En estudios previos también se han determinado perfiles de cambio de color frente a diferentes concentraciones de CO₂, mediante la combinación de RM y AB en proporción de 3:2, obteniendo resultados favorables para la detección de CO₂ (H. Chen et al., 2018; Nopwinyuwong et al., 2010; Rukchon et al., 2014). Sin embargo, la sensibilidad y el cambio de color de las etiquetas depende en gran medida de su composición y características estructurales, tales como la concentración de los indicadores, la matriz polimérica y los plastificantes empleados (Feng et al., 2023; Obaidi et al., 2022; Zhai et al., 2025), así como del pH inicial ajustado del indicador, el cual determinar la sensibilidad y la transición del cambio de color al reaccionar con CO₂ (Obaidi et al., 2022; Y. Zhang & Lim, 2018). Por ello, se caracterizaron las etiquetas indicadoras para evaluar su desempeño frente al CO₂.

4.3.4. Resultados de la validación de la etiqueta indicadora en condiciones reales de envasado con microperforaciones

4.3.4.1. Concentración de CO₂ en el envase

Como se muestra en la **Figura 19**, la concentración de CO₂ durante el almacenamiento de los frutos de aguacate 'Hass' en bolsas plásticas con diferentes niveles de microperforación presentó un incremento en todas las muestras, con un aumento rápido al inicio, lo cual se debe a la respiración del producto, mediante el consumo de O₂ y la producción de CO₂. Los frutos almacenados sin perforaciones presentaron las concentraciones más altas de CO₂, con un incremento progresivo durante el almacenamiento, a diferencia de aquéllos con 10 y 20 microperforaciones, también presentaron un aumento rápido al inicio, pero tendieron a estabilizarse ligeramente después de las 4 h. Este comportamiento también se observó en los estudios realizados por (Espinosa-Cruz et al., 2014). Además, no presentaron diferencias significativas entre M10 y M20, pero ambos presentaron concentraciones de CO₂ significativamente inferiores respecto a M0.

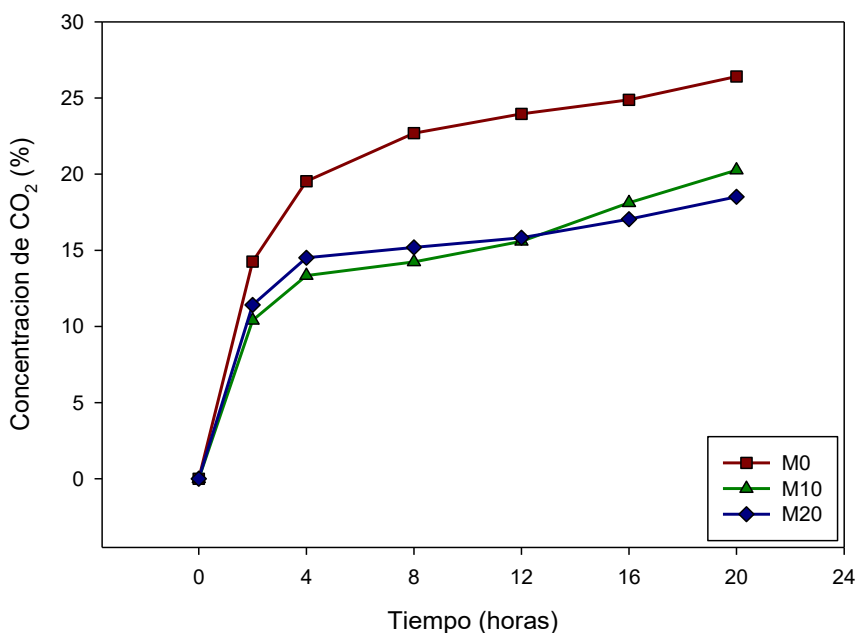


Figura 19. Cambios en la concentración de CO₂ durante el almacenamiento en frutos de aguacate 'Hass' a 24 ° C con diferentes niveles de microperforación: sin perforación (M0), con 10 microperforaciones (M10) y con 20 microperforaciones (M20).

4.3.4.2. Cambio de color de las etiquetas indicadoras

Para evaluar la efectividad de las etiquetas indicadoras desarrolladas, es decir, su capacidad para monitorear de manera precisa las concentraciones de CO₂ en frutos envasados en atmósfera modificada, las etiquetas se integraron en las bolsas junto con los frutos, utilizando diferentes niveles de microperforación con el propósito de generar variaciones en la concentración de CO₂ y determinar su correlación con el cambio de color. Con los parámetros de color (L*, a*, b*), se obtuvieron los atributos de color (L*, Hue y Croma) para determinar el color resultante. Como se muestra en la **Figura 20**, las etiquetas indicadoras mostraron cambios de color rápidos durante las primeros 2 h, alcanzando valores de $\Delta E \geq 40$ debido al incremento inicial de CO₂ dentro de los envases.

En la (**Figura 20a, b**), se muestra el cambio de color de las etiquetas indicadoras durante el almacenamiento sin perforaciones. El cambio de color de la etiqueta con dos indicadores se caracterizó por una transición cromática en cuatro fases. Al inicio del almacenamiento, las etiquetas tenían un color verde oscuro con un valor de Hue de 121.64, luego durante las primeras dos horas se observó un cambio de color muy pronunciado, con valores de ΔE superiores a 46 y una disminución del Hue a 83.10, obteniendo un color amarillo brillante correspondiente a una concentración de CO₂ del 14.87 %.

Después, a las cuatro horas, el valor de Hue disminuyó a 77.55, con un incremento de ΔE a 47.82, con una concentración de CO₂ del 20 % resultando a un color amarillo anaranjado. Posteriormente, entre las 8 y 20 h, no se observaron cambios de color significativas, ya que la concentración de CO₂ varió entre 22.75–26.53 %, con un incremento porcentual no mayor a 5 %, lo que resultó en un color naranja con valores de Hue comprendidos entre 69.85 y 66.82. En contraste, las etiquetas con tres indicadores mostraron un cambio de color muy pronunciado pasando de verde oscuro a naranja oscuro durante las primeras dos horas, con un valor de ΔE a 42, seguida de una estabilización del color a pesar del incremento sostenido en la concentración de CO₂.

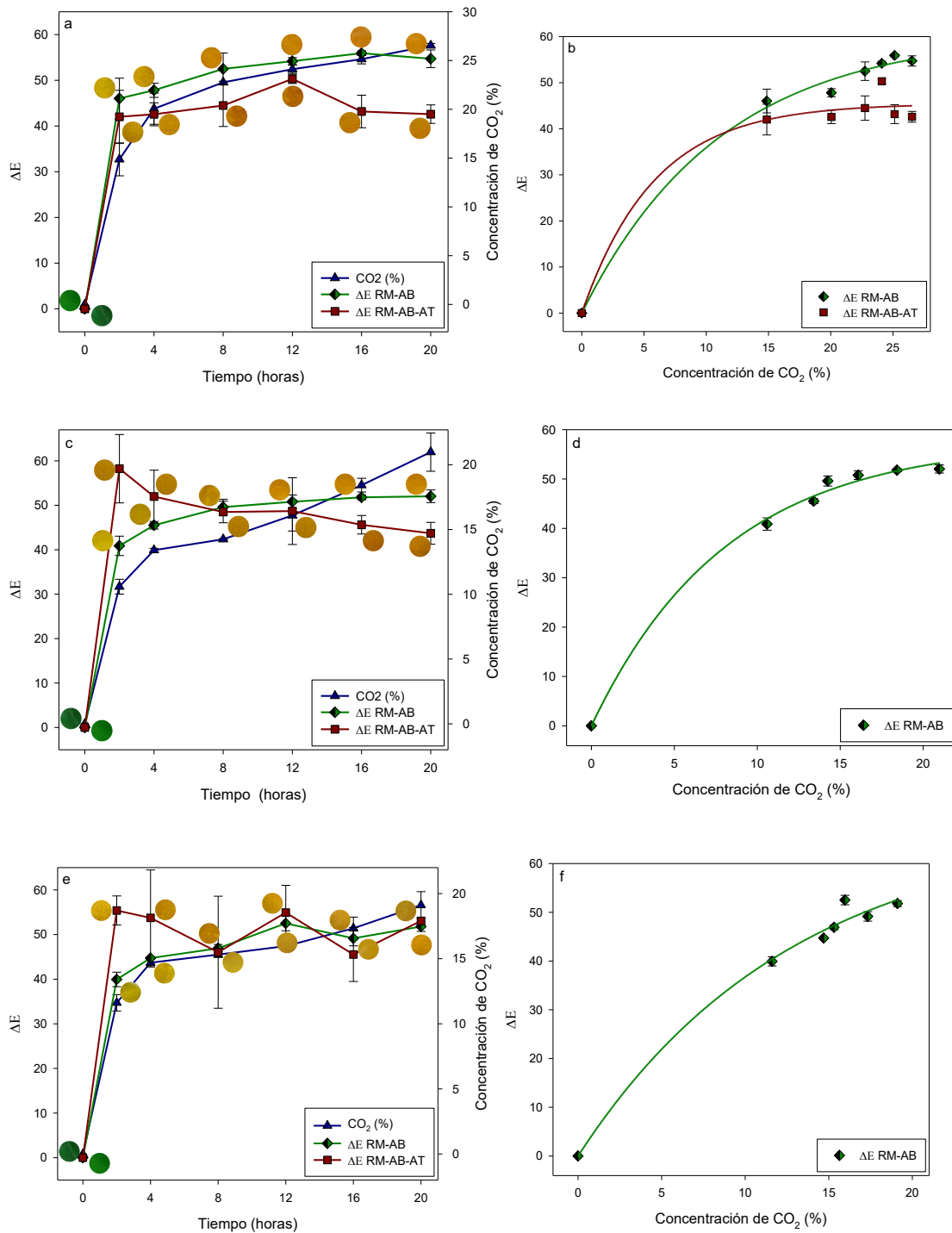


Figura 20. Cambio de color total (ΔE) y concentración de CO_2 durante el almacenamiento de frutos a $24^\circ C$ con diferentes niveles de perforación: sin perforación (a, b), con 10 microperforaciones (c, d), y con 20 microperforaciones (e, f). Las barras representan el error estándar de la media de tres repeticiones.

La correlación entre los parámetros se analizó ajustando los valores de ΔE en función de la concentración de CO_2 a modelos de regresión no lineal de la forma $\Delta E = y_0 + a(1 - \exp(-b \cdot \text{CO}_2))$, obteniéndose coeficientes de determinación (R^2) de 0.98 y 0.94, respectivamente. Estos resultados muestran una alta correlación positiva entre los parámetros, especialmente en las etiquetas con dos indicadores, donde el incremento continuo de CO_2 se asoció con el aumento progresivo de los valores de la ΔE . Aunque el cambio de color más notable ocurrió durante las primeras horas de almacenamiento, los cambios posteriores fueron más graduales o pocos perceptibles a simple vista.

Respecto a la **(Figura 20c)**, las etiquetas almacenadas con 10 microperforaciones mostraron un comportamiento similar con la figura anterior, mostrando un cambio de color en cuatro fases con ligeras variaciones cromáticas. Inicialmente, el color verde oscuro cambio a amarillo brillante con tonalidades de oliva ($\Delta E = 40$, Hue = 84.77), correspondiente a una concentración de CO_2 del 11 %. Después, a las cuatro horas, con un aumento de CO_2 al 13.4 % el valor de Hue disminuyo a 78.51 y el ΔE aumentó a 45.52, lo que resultó a un color amarillo anaranjado. Posteriormente, a partir de las 8 h, el color se volvió naranja (Hue ≈ 71.5) manteniéndose estable hasta las veinte horas a pesar de que la concentración de CO_2 aumento de 14.25 % al 20 %, con un ΔE superiores a 50. En la **(Figura 20d)** se observó una buena correlación entre el cambio de color y la concentración de CO_2 , ajustándose adecuadamente a modelos de regresión no lineal ($R^2=0.99$). Mientras que las etiquetas con tres indicadores mostraron cambios rápidos al inicio, alcanzando valores de $\Delta E \geq 58$ durante las primeras dos horas, pero posteriormente los valores descendieron durante el almacenamiento, sin mostrar una correlación con la concentración de CO_2 .

Los resultados de las etiquetas almacenadas con 20 micropeforaciones se muestran en la **(Figura 20e)**, donde se observa un cambio de color de cuatro etapas. El color verde oscuro inicial de la etiqueta cambió a amarillo con tonalidades de oliva (Hue= 85.70; ΔE a 39.93) durante las primeras dos horas

con una concentración de CO₂ del 11.6 %, luego a las cuatro horas se volvió amarillo intenso (Hue = 81.13), correspondiente a una concentración de CO₂ del 14.7 %. Posteriormente, a las ocho horas se observó un cambio de color gradual, alcanzando a las veinte horas un color amarillo anaranjado brillante (Hue $\approx$ 75.6 y $\Delta E \approx$ 51) con una concentración de CO₂ del 19.11 %. En la (**Figura 20f**) se muestra la correlación entre el cambio de color y la concentración de CO₂, el cual presentó una alta correlación positiva con un coeficiente de determinación de (R^2) 0.98. Respecto a las etiquetas con tres indicadores, después de un cambio muy pronunciado al inicio, ya no se observaron cambios significativos en los valores de ΔE durante el resto del almacenamiento.

En general, el cambio de color de las etiquetas con dos indicadores siguió una tendencia similar con lo observado en la simulación del perfil de cambio de color realizada en la sección 4.3.3. logrando discriminar de manera efectiva las concentraciones de CO₂ durante la aplicación real, aunque con ligeras variaciones cromáticas. Esto sugiere un alto potencial para el monitoreo de CO₂ en productos envasados en atmósfera modificada. Como se observó en la (**Figura 20c, e**), durante las primeras dos horas las etiquetas exhibieron un color amarillo con tonalidades de oliva, correspondiente a concentraciones de CO₂ de 10.6 a 11.6 %, similar a lo observado en la simulación con un 12 % de CO₂, después cuando alcanzaron un valor de CO₂ entre 15 % a 20 % se volvieron a color amarillo anaranjado debido a que se vuelven menos sensibles cuando se acercan a un pH más ácido. Por lo tanto, los resultados indican que las etiquetas son efectivas, ya que refleja patrones de color similares con la simulación realizadas con la mezcla de rojo de metilo y azul de bromotimol. En cuanto a las ligeras variaciones cromáticas observadas puede atribuirse a la composición compleja del espacio de cabeza en el sistema de envasado real, ya que en el entorno circundante se presentan diversas interacciones entre el CO₂, la humedad relativa dentro del envase, los colorantes sensibles al pH y la matriz polimérica, las cuales determinan la sensibilidad y respuesta de las etiquetas (Karaca et al., 2023; Lu et al., 2020; Y. Zhang & Lim, 2018).

Además, los altos valores de ΔE obtenidos durante la aplicación real de las etiquetas pueden atribuirse a la mayor solubilidad del CO₂ en la matriz polimérica bajo condiciones de alta humedad relativa, generada por la actividad fisiológica continua del producto (respiración y transpiración). Asimismo, la matriz utilizada para inmovilizar los indicadores es altamente hidrofílica, lo cual incrementa la absorción de humedad afectando la sensibilidad de la etiqueta, provocando una respuesta más rápida y una detección máxima en menor tiempo respecto a las simulaciones estándar. Este comportamiento puede limitar la capacidad de reacción de la etiqueta durante las simulaciones, ya que depende solo en la concentración de CO₂ y el contenido de humedad residual. Por lo tanto, la alta sensibilidad y rápida respuesta de los indicadores frente al CO₂, se deben a la rápida absorción de vapor de agua en la matriz polimérica y a la rápida disociación del CO₂, que libera protones para acidificar el indicador (Karaca et al., 2023; Lu et al., 2020). Aunque las etiquetas se desarrollaron con una estructura laminada de tres capas con Tyvek 1073D, se desarrolló un material altamente permeable al vapor de agua. Por ello, sería recomendable utilizar matrices más hidrofóbicas, con menor afinidad por la humedad, pero permeable a gases como el CO₂, con el fin de mejorar la estabilidad y prevenir transferencias de masa no deseadas, lo cual es crucial para la aplicación industrial (Y. Zhang & Lim, 2018). Por ello, durante el desarrollo de indicadores colorimétricos deben validarse su desempeño en sistemas de envasados reales, para validar su capacidad de respuesta con la reacción de CO₂, ya que se ha observado comportamientos no favorables, al obtener un color diferente en la aplicación real de los envases en comparación con el color obtenido durante la simulación.

Estos resultados muestran que las interacciones complejas en el espacio de cabeza deben ser bien investigadas para cumplir con la función esperada de las etiquetas inteligentes, evitando resultados no deseados e interpretaciones falsas de los cambios de color (Karaca et al., 2023; Lu et al., 2020).

4.3.5. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

El cambio de la estructura química de la etiqueta indicadora durante el proceso de almacenamiento se analizó mediante FITR, cuyos resultados se muestra en la **Figura 21**. En el espectro correspondiente a las etiquetas antes de almacenamiento (CMC-IND) se observó una banda característica a 3272 cm^{-1} correspondiente a las vibraciones de estiramiento del grupo-O-H debido a los grupos hidroxilos de CMC y el glicerol. Las bandas de absorción a 2931 cm^{-1} y 2878 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de estiramiento asimétrica y simétrica de los enlaces C-H del metileno (CH_2) de la CMC (Ezati et al., 2021; Jiang et al., 2024; Rong et al., 2023). Además, se identificó un pico intenso a 1586 cm^{-1} asociado a las vibraciones de estiramiento asimétrico del grupo carboxilato (COO^-) de la CMC (Wandee et al., 2019; Wu & Li, 2023). (Boccalon et al., 2022), y las bandas observadas en 1018 cm^{-1} corresponde a la vibración de estiramiento C-O de los alcoholes de CM y el glicerol (Jia et al., 2025; Jiang et al., 2024). Las absorciones que se observó en la etiqueta indicadora están asociadas con la presencia de CMC como componente principal de la etiqueta, por lo que se aprecian picos característicos de la CMC.

Después de 20 h de almacenamiento, las etiquetas indicadoras (CM-RM-ABT) y (CMC-RM-ABT-AT) exhibieron un espectro casi similar que el de (CM-IND). No obstante, se observó una ligera diferencia en la intensidad de los picos y desplazamientos, caracterizada por la presencia de bandas de longitudes de onda de 3283 cm^{-1} y 3288 cm^{-1} con mayores intensidades, el cual puede atribuirse a la absorción de vapor de agua por las etiquetas debido a la naturaleza hidrofílica del CMC. Esta absorción condujo a la formación de enlaces de hidrogeno, lo que causo la desaparición parcial o completa de los picos entre 2931 cm^{-1} y 2878 cm^{-1} . Además, se observó una disminución de la intensidad del pico a 1586 cm^{-1} y un ligero desplazamiento hacia 1637 cm^{-1} lo que puede atribuirse a la protonación parcial de los grupos carboxilatos que forman ácidos carboxílicos, pero la reacción parcial de la etiqueta hace que el pico a 1586 cm^{-1} siga siendo visible (Wilpiszewska et al., 2020).

En el caso de la etiqueta (CMC-RM-ABT-AT), se observa un ligero pico a una longitud de onda de 2360 cm^{-1} , lo que le podría atribuirse la presencia del grupo $\text{O}=\text{C}=\text{O}$, como el dióxido de carbono (Dirpan et al., 2024; Nandiyanto et al., 2022). Esto podría indicar que el cambio de color de la etiqueta indicadora se debió a la presencia de este gas como resultado de la respiración del producto durante el almacenamiento. Aunque en la etiqueta de (CMC-RM-ABT) no se observa ningún comportamiento similar, ya que este gas se libera rápidamente, lo que hace que el indicador sea reversible regresando a su color original.

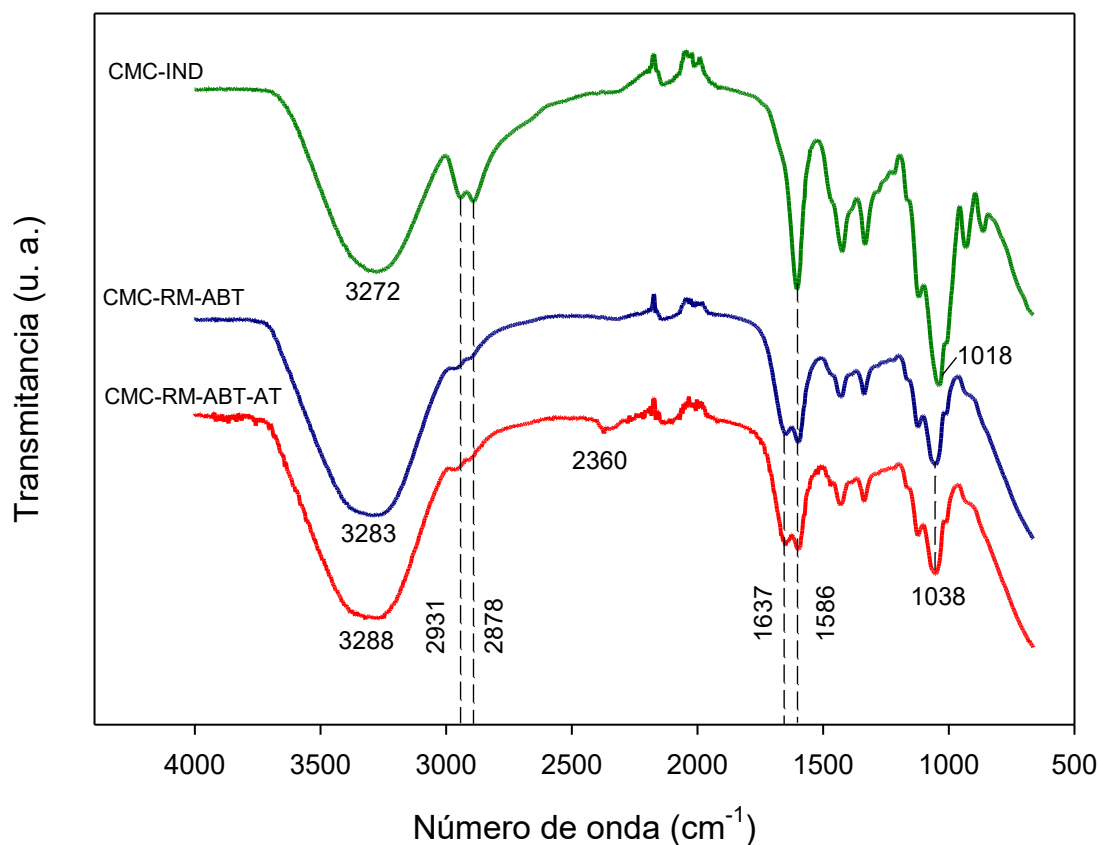


Figura 21. Resultados de los espectros FTIR de las etiquetas indicadoras basadas en carboximetilcelulosa con indicadores ácido-base: etiquetas sin reaccionar (CMC-IND), etiquetas después del almacenamiento con dos indicadores (CMC-RM-ABT) y con tres indicadores (CMC-RM-ABT-AT).

Cuadro 4. Atributos de color (L, Hue, Croma y ΔE) de etiquetas indicadoras durante el almacenamiento de frutos a 24°C bajo diferentes niveles de microperforación.

Perforación	Variables	Tiempo de almacenamiento (horas)						
		0	2	4	8	12	16	20
M0	Etiqueta indicadora (RM-ABT)							
	L	39.64 ± 0.00b	56.74 ± 3.94a	51.96 ± 4.61a	51.37 ± 4.71a	54.16 ± 4.18a	54.21 ± 6.25a	50.13 ± 2.66ab
	Hue	121.64 ± 0.00a	83.10 ± 1.21b	77.55 ± 1.18b	69.85 ± 3.62c	68.83 ± 2.23c	67.25 ± 2.42c	66.82 ± 1.35c
	C	65.04 ± 0.00a	62.24 ± 13.31a	54.02 ± 11.07a	42.61 ± 10.90a	47.43 ± 6.51a	47.91 ± 9.86a	47.17 ± 2.91a
	ΔE	0.00 ± 0.00d	46.02 ± 4.46c	47.82 ± 1.55bc	52.49 ± 3.48abc	54.19 ± 0.77ab	55.92 ± 0.52a	54.71 ± 1.93a
	Etiqueta indicadora (RM-ABT-AT)							
	L	34.99 ± 0.00b	52.83 ± 3.75a	55.27 ± 4.41a	54.33 ± 9.21a	50.76 ± 6.37a	53.38 ± 4.84a	53.43 ± 1.64a
	Hue	129.82 ± 0.00a	78.06 ± 1.74b	71.75 ± 2.06c	68.47 ± 1.71c	70.10 ± 2.04c	67.68 ± 3.46c	69.37 ± 0.99c
	C	37.38 ± 0.00a	44.52 ± 15.22a	38.27 ± 9.08a	39.94 ± 0.31a	53.41 ± 6.51a	36.67 ± 11.29a	38.30 ± 5.98a
	ΔE	0.00 ± 0.00b	42.00 ± 5.79a	42.57 ± 2.51a	44.48 ± 4.58a	50.32 ± 1.02a	43.18 ± 3.55a	42.59 ± 2.03a
M10	Etiqueta indicadora (RM-ABT)							
	L	39.64 ± 0.00a	50.92 ± 1.43a	47.68 ± 7.38a	47.80 ± 5.72a	48.97 ± 1.04a	48.42 ± 3.88a	47.36 ± 4.26a
	Hue	121.64 ± 0.00a	84.77 ± 1.32b	78.51 ± 1.00c	73.22 ± 1.26d	71.19 ± 2.42d	70.09 ± 1.09d	69.96 ± 1.10d
	C	65.04 ± 0.00a	55.85 ± 8.09ab	48.33 ± 7.55ab	45.04 ± 8.32b	45.51 ± 4.85b	45.84 ± 5.66b	45.16 ± 9.20b
	ΔE	0.00 ± 0.00d	40.88 ± 2.17c	45.52 ± 0.85b	49.60 ± 1.76a	50.79 ± 1.52a	51.79 ± 0.54a	52.03 ± 1.43a
	Etiqueta indicadora (RM-ABT-AT)							
	L	34.99 ± 0.00b	53.26 ± 2.62a	54.05 ± 3.38a	53.19 ± 5.30a	50.49 ± 5.91a	51.03 ± 4.20a	51.44 ± 6.01a
	Hue	129.82 ± 0.00a	79.55 ± 0.58b	73.83 ± 3.56bc	71.01 ± 1.86c	71.18 ± 2.84c	71.27 ± 2.69c	71.57 ± 3.19c
	C	37.38 ± 0.00b	70.84 ± 9.45a	57.01 ± 13.42ab	50.71 ± 0.69ab	51.72 ± 11.63ab	47.70 ± 3.04ab	42.51 ± 12.96b
	ΔE	0.00 ± 0.00c	58.25 ± 7.70a	51.96 ± 5.94ab	48.51 ± 2.42ab	48.69 ± 7.51ab	45.62 ± 2.09ab	43.71 ± 2.46b
M20	Etiqueta indicadora (RM-ABT)							
	L	39.64 ± 0.00b	49.70 ± 6.58ab	52.52 ± 3.09a	50.04 ± 1.94a	52.49 ± 2.41a	48.18 ± 5.67ab	51.62 ± 1.29a
	Hue	121.64 ± 0.00a	85.70 ± 0.44b	81.13 ± 0.44c	78.15 ± 1.63d	76.36 ± 0.71de	74.45 ± 1.10e	76.26 ± 0.69de
	C	65.04 ± 0.00a	56.81 ± 7.54a	58.82 ± 2.18a	56.12 ± 10.59a	68.32 ± 4.11a	53.53 ± 4.69a	67.01 ± 1.51a
	ΔE	0.00 ± 0.00e	39.93 ± 1.62d	44.71 ± 0.28c	46.92 ± 0.87bc	52.51 ± 1.67a	49.15 ± 1.69ab	51.79 ± 1.08a
	Etiqueta indicadora (RM-ABT-AT)							
	L	34.99 ± 0.00b	54.67 ± 2.05a	52.11 ± 5.45a	48.51 ± 7.63a	51.07 ± 2.89a	52.62 ± 6.59a	49.95 ± 0.63a
	Hue	129.82 ± 0.00a	79.61 ± 1.26b	76.46 ± 0.85bc	74.03 ± 2.55c	74.61 ± 1.75c	74.12 ± 2.88c	75.50 ± 1.06bc
	C	37.38 ± 0.00b	66.88 ± 5.23a	63.03 ± 11.94ab	49.77 ± 19.23ab	63.72 ± 8.00ab	47.86 ± 12.81ab	62.66 ± 1.17ab
	ΔE	0.00 ± 0.00b	55.39 ± 3.27a	53.72 ± 10.74a	46.03 ± 12.56a	54.91 ± 6.12a	45.53 ± 6.04a	53.06 ± 0.77a

Los datos representan la media ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$)

Cuadro 5. Concentraciones de CO₂ en frutos almacenados a 24 °C durante 20 h con diferentes niveles de microperforación.

Perforación	Tiempo de almacenamiento (horas)						
	0	2	4	8	12	16	20
0	0.00 ± 0.00 (a)	14.87 ± 1.68 (b)	20.06 ± 1.60 (c)	22.75 ± 0.12 (d)	24.11 ± 0.42 (ed)	25.13 ± 0.48 (ed)	26.53 ± 0.22 (e)
10	0.00 ± 0.00 (a)	10.59 ± 0.57 (b)	13.40 ± 0.15 (c)	14.25 ± 0.04 (dc)	16.09 ± 1.20 (d)	18.42 ± 0.53 (e)	20.97 ± 1.47 (f)
20	0.00 ± 0.00 (a)	11.61 ± 0.63 (b)	14.70 ± 0.33 (c)	15.32 ± 0.22 (c)	15.97 ± 0.27 (dc)	17.33 ± 0.86 (d)	19.11 ± 1.04 (e)

Los datos representan la media ± desviación estándar. Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas (Tukey, p≤0.05)

4.4. Conclusión

Los resultados derivados en esta investigación demostraron que los indicadores ácido-base como el RM, ABT y AT exhiben cambios de color en función de las concentraciones de CO₂. Sin embargo, durante la determinación del perfil del cambio de color a partir de soluciones estándar, se observó que la mezcla de dos indicadores como el RM y ABT genera resultados más prometedores para la detección de diferentes niveles de concentración de CO₂, mostrando una mayor sensibilidad a concentraciones bajas. Durante la aplicación bajo condiciones reales, las etiquetas con dos indicadores mostraron una buena correlación entre las concentraciones de CO₂ y el cambio de color, a diferencia de la etiqueta con tres indicadores no presentaron una correlación consistente con los niveles de CO₂ durante el almacenamiento del fruto. Por tanto, la etiqueta desarrollada con dos indicadores representa una alternativa viable para monitorear en tiempo real la calidad de los productos hortofrutícolas envasados en atmósfera modificada, mediante el cambio de color que permite identificar visualmente los niveles de CO₂.

4.5. Literatura citada

- Akhila, K., Singh, S., & Gaikwad, K. K. (2024). New smart packaging technologies for monitoring quality of agriculture produce. In *Novel Packaging Systems for Fruits and Vegetables* (pp. 195–218). Apple Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003415701>
- Alam, A. U., Rathi, P., Beshai, H., Sarabha, G. K., & Deen, M. J. (2021). Fruit quality monitoring with smart packaging. *sensors*, 21(4), 1509. <https://doi.org/10.3390/s21041509>
- Banda, K., Caleb, O. J., Jacobs, K., & Opara, U. L. (2015). Effect of active-modified atmosphere packaging on the respiration rate and quality of pomegranate arils (cv. Wonderful). *Postharvest Biology and Technology*, 109, 97–105. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2015.06.002>
- Boccalon, E., Viscusi, G., Lamberti, E., Fancello, F., Zara, S., Sassi, P., Marinozzi, M., Nocchetti, M., & Gorrasi, G. (2022). Composite films containing red onion skin extract as intelligent pH indicators for food packaging. *Applied Surface Science*, 593, 153319. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2022.153319>
- Chen, H., Zhang, M., Bhandari, B., & Guo, Z. (2018). Applicability of a colorimetric indicator label for monitoring freshness of fresh-cut green bell pepper. *Postharvest Biology and Technology*, 140, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.02.011>
- Dirpan, A., Langkong, J., Laga, A., Djalal, M., Khosuma, M., Nurhisna, N. I., & Azkiyah, M. (2024). Fabrication of freshness indicators based on methylcellulose-containing color indicator solutions for monitoring the quality of coconut water. *Heliyon*, 10(6), e28317. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28317>
- Du, L., Huang, X., Li, Z., Qin, Z., Zhang, N., Zhai, X., Shi, J., Zhang, J., Shen, T., Zhang, R., & Wang, Y. (2025). Application of smart packaging in fruit and vegetable preservation: A review. *Foods*, 14(3), 447. <https://doi.org/10.3390/FOODS14030447>
- Dwibedi, V., Kaur, G., George, N., Rana, P., Ge, Y., & Sun, T. (2024). Research progress in the preservation and packaging of fruits and vegetables: From traditional methods to innovative technologies. *Food Packaging and Shelf Life*, 46, 101385. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2024.101385>
- Espinosa-Cruz, C. C., Valle-Guadarrama, S., Ybarra-Moncada, Ma. C., & Martínez-Damián, M. T. (2014). Comportamiento postcosecha de frutos de aguacate ‘Hass’ afectado por temperatura y atmósfera modificada con microperforado. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(3), 235. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v37n3/v37n3a9.pdf>
- Ezati, P., Priyadarshi, R., Bang, Y. J., & Rhim, J. W. (2021). CMC and CNF-based intelligent pH-responsive color indicator films integrated with shikonin to monitor fish freshness. *Food Control*, 126, 108046. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2021.108046>

- Fang, Y., & Wakisaka, M. (2021). A Review on the modified atmosphere preservation of fruits and vegetables with cutting-edge technologies. *Agriculture* 2021, Vol. 11, Page 992, 11(10), 992. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE11100992>
- Feng, T., Chen, H., & Zhang, M. (2023). Applicability and freshness control of pH-sensitive intelligent label in cool chain transportation of vegetables. *Foods*, 12(18), 3489. <https://doi.org/10.3390/FOODS12183489>
- García-Cruz, L., Valle-Guadarrama, S., Salinas-Moreno, Y., & Luna-Morales, C. del C. (2016). Postharvest quality, soluble phenols, betalains content, and antioxidant activity of *Stenocereus pruinosus* and *Stenocereus stellatus* fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.07.004>
- He, X., Pu, Y., Chen, L., Jiang, H., Xu, Y., Cao, J., & Jiang, W. (2023). A comprehensive review of intelligent packaging for fruits and vegetables: Target responders, classification, applications, and future challenges. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(2), 842–881. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13093>
- Jia, H., Wu, C., Huang, M., & Zhu, Q. (2025). An intelligent fruit freshness monitoring system using hydrophobic indicator labels based on methylcellulose, k-carrageenan, and sodium tripolyphosphate, combined with deep learning. *International Journal of Biological Macromolecules*, 291, 140001. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2025.140001>
- Jiang, H., Zhao, S., Li, Z., Chen, L., Mo, H., & Liu, X. (2024). Swan-feathers inspired smart-responsive sustainable carboxymethyl cellulose/polyvinyl alcohol based food packaging film for robustly integrated Intelligent and Active Packaging. *Nano Today*, 56, 102272. <https://doi.org/10.1016/J.NANTOD.2024.102272>
- Kaewprachu, P., Romruen, O., Jaisan, C., Rawdkuen, S., & Klunklin, W. (2024). Smart colorimetric sensing films based on carboxymethyl cellulose incorporated with a natural pH indicator. *International Journal of Biological Macromolecules*, 259, 129156. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.129156>
- Karaca, I. M., Haskaraca, G., Ayhan, Z., & Gültekin, E. (2023). Development of real time-pH sensitive intelligent indicators for monitoring chicken breast freshness/spoilage using real packaging practices. *Food Research International*, 173, 113261. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113261>
- Lee, E. J., & Shin, H. S. (2019). Development of a freshness indicator for monitoring the quality of beef during storage. *Food Science and Biotechnology*, 28(6), 1899–1906. <https://doi.org/10.1007/S10068-019-00633-5/TABLES/3>
- Lee, K., Baek, S., Kim, D., & Seo, J. (2019). A freshness indicator for monitoring chicken-breast spoilage using a Tyvek® sheet and RGB color analysis. *Food*

Packaging and Shelf Life, 19, 40–46.
<https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2018.11.016>

- Li, Y., Wu, Y., & Li, C. (2024). Development of CO₂-sensitive antimicrobial bilayer films based on gellan gum and sodium alginate/sodium carboxymethyl cellulose and its application in strawberries. *International Journal of Biological Macromolecules*, 264, 130572. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.130572>
- Liu, L., Wu, W., Zheng, L., Yu, J., Sun, P., & Shao, P. (2022). Intelligent packaging films incorporated with anthocyanins-loaded ovalbumin-carboxymethyl cellulose nanocomplexes for food freshness monitoring. *Food Chemistry*, 387, 132908. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2022.132908>
- Liu, Y., Ma, Y., Liu, Y., Zhang, J., Hossen, M. A., Sameen, D. E., Dai, J., Li, S., & Qin, W. (2022). Fabrication and characterization of pH-responsive intelligent films based on carboxymethyl cellulose and gelatin/curcumin/chitosan hybrid microcapsules for pork quality monitoring. *Food Hydrocolloids*, 124, 107224. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2021.107224>
- Lu, P., Yang, Y., Liu, R., Liu, X., Ma, J., Wu, M., & Wang, S. (2020). Preparation of sugarcane bagasse nanocellulose hydrogel as a colourimetric freshness indicator for intelligent food packaging. *Carbohydrate Polymers*, 249, 116831. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2020.116831>
- Luo, X., Zaitoon, A., & Lim, L. T. (2022). A review on colorimetric indicators for monitoring product freshness in intelligent food packaging: Indicator dyes, preparation methods, and applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(3), 2489–2519. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12942>
- Mahajan, P. V., & Lee, D. S. (2023). Modified atmosphere and moisture condensation in packaged fresh produce: Scientific efforts and commercial success. *Postharvest Biology and Technology*, 198, 112235. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2022.112235>
- Nandiyanto, A. B. D., Ragadhita, R., & Fiandini, M. (2022). Interpretation of Fourier Transform Infrared Spectra (FTIR): A practical approach in the polymer/plastic thermal decomposition. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 8(1), 113–126. <https://doi.org/10.17509/ijost.v8i1.53297>
- Nopwinyuwong, A., Trevanich, S., & Suppakul, P. (2010). Development of a novel colorimetric indicator label for monitoring freshness of intermediate-moisture dessert spoilage. *Talanta*, 81(3), 1126–1132. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.02.008>
- Obaidi, A. Al, Karaca, I. M., Ayhan, Z., Haskaraca, G., & Gultekin, E. (2022). Fabrication and validation of CO₂-sensitive indicator to monitor the freshness of poultry meat. *Food Packaging and Shelf Life*, 34, 100930. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100930>

- Panou, A., Lazaridis, D. G., & Karabagias, I. K. (2025). Application of smart packaging on the preservation of different types of perishable fruits. *Foods*, 14(11), 1878. <https://doi.org/10.3390/FOODS14111878>
- Rong, L., Zhang, T., Ma, Y., Wang, T., Liu, Y., & Wu, Z. (2023). An intelligent label using sodium carboxymethyl cellulose and carrageenan for monitoring the freshness of fresh-cut papaya. *Food Control*, 145, 109420. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109420>
- Rukchon, C., Nopwinyuwong, A., Trevanich, S., Jinkarn, T., & Suppakul, P. (2014). Development of a food spoilage indicator for monitoring freshness of skinless chicken breast. *Talanta*, 130, 547–554. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.07.048>
- Tang, T., Zhang, M., Jia, H., Bhandari, B., & Guo, Z. (2025). Intelligent monitoring of fruit and vegetable freshness in supply chain based on 3D printing and lightweight deep convolutional neural networks (DCNN). *Food Chemistry*, 480, 143886. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2025.143886>
- Wandee, Y., Uttapap, D., & Mischnick, P. (2019). Yield and structural composition of pomelo peel pectins extracted under acidic and alkaline conditions. *Food Hydrocolloids*, 87, 237–244. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2018.08.017>
- Wilpiszewska, K., Antosik, A. K., Schmidt, B., Janik, J., & Rokicka, J. (2020). Hydrophilic films based on carboxymethylated derivatives of starch and cellulose. *Polymers*, 12(11), 2447. <https://doi.org/10.3390/POLYM12112447>
- Wu, Y., & Li, C. (2023). A double-layer smart film based on gellan gum/modified anthocyanin and sodium carboxymethyl cellulose/starch/Nisin for application in chicken breast. *International Journal of Biological Macromolecules*, 232, 123464. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.123464>
- Zhai, X., Xue, Y., Sun, Y., Ma, X., Ban, W., Marappan, G., Tahir, H. E., Huang, X., Wu, K., Chen, Z., Zou, W., Liu, B., Zhang, L., Yang, Z., & Katona, J. (2025). Colorimetric food freshness indicators for intelligent packaging: progress, shortcomings, and promising solutions. *Foods*, 14(16), 2813. <https://doi.org/10.3390/FOODS14162813>
- Zhang, Y., & Lim, L. T. (2018). Colorimetric array indicator for NH₃ and CO₂ detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 255, 3216–3226. <https://doi.org/10.1016/J.SNB.2017.09.148>
- Zhao, Y., El-Sherif, D. M., Cheng, J., Zhang, H., Hu, Z., Wu, Q., Shen, H., Yu, Z., & Xie, Y. (2025). Carboxymethyl cellulose-based colorimetric sensor array incorporating ionic liquid-tuned anthocyanin and nano-silica coating for pork freshness monitoring. *Food Hydrocolloids*, 158, 110601. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2024.110601>

5. CONCLUSIONES GENERALES

Se evaluó el comportamiento de un envase inteligente en modalidad de atmósfera modificada con microperforado que usó un sensor cromóforo basado en biopolímeros de carboximetilcelulosa incorporados con los indicadores ácido-base rojo de metilo (RM), azul de bromotimol (ABT) y azul de timol (AT), con estructura bicapa y tricapa. El sensor cromóforo mostró potencial adecuado para monitorear cambios de dióxido de carbono en el espacio de cabeza de frutos de aguacate 'Hass' a través de la modificación del pH, lo cual fue relacionado con el comportamiento respiratorio. Los sensores cromóforos con dos indicadores ácido-base presentaron una mejor respuesta, con alta correlación entre el cambio de color y el incremento de CO₂.