



# DESAFÍOS EN MADURACIÓN Y POSTCOSECHA DE FRUTOS Y HORTALIZAS

Carmen Merodio-María Isabel Escribano-María Teresa Sánchez-Ballesta-Irene Romero  
(Editoras)

# Desarrollo de un sistema experimental para emular el efecto de los cambios de presión durante el transporte de productos hortofrutícolas envasados en materiales microperforados

S., Vega-Diez<sup>1,2</sup>, M.L., Salvador<sup>2</sup>, J., González-Buesa<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciencia Vegetal, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), Instituto Agroalimentario de Aragón - IA2 (CITA - Universidad de Zaragoza), Av. Montañana 930, 50059, Zaragoza, ES.

<sup>2</sup>Grupo de Investigación en Alimentos de Origen Vegetal, Universidad de Zaragoza, Instituto Agroalimentario de Aragón-IA2 (Universidad de Zaragoza-CITA), Miguel Servet 177, 50013, Zaragoza, ES. [svega@cita-aragon.es](mailto:svega@cita-aragon.es)

## Resumen

El envasado en atmósferas modificadas (MAP) con materiales microperforados es una tecnología ampliamente extendida para preservar la calidad y seguridad de frutas y hortalizas, ya que las microperforaciones aumentan el intercambio gaseoso a través del envase y por lo tanto se adaptan a los requerimientos de estos productos. Durante el transporte terrestre o aéreo se producen cambios acusados en la presión atmosférica en el exterior del envase como consecuencia de los cambios de altitud. Para compensar esta diferencia de presiones entre el envase y el exterior, se produce un flujo convectivo a través de las microperforaciones, modificando de la composición gaseosa en el interior del envase. El objetivo de este trabajo fue diseñar y poner a punto un sistema experimental que permitiera cuantificar el efecto de los cambios en la presión atmosférica en la composición gaseosa en envases microperforados, emulando lo que ocurre durante el transporte de productos hortofrutícolas envasados en MAP. El sistema consta de una cámara de vacío, un sensor de presión y una válvula accionada por un controlador que permite la entrada o salida de aire de la cámara según la diferencia entre la señal enviada por el sensor y la presión de referencia, establecida por la ruta de transporte seleccionada. Dentro de la cámara se encuentra un envase microperforado en el que se puede hacer un seguimiento de la composición gaseosa de su interior. El sistema desarrollado es capaz de reproducir los cambios de presión atmosférica que se producen durante un transporte terrestre o aéreo, y los datos obtenidos revelan la importancia considerar los cambios de presión para predecir adecuadamente la evolución de la atmósfera modificada.

**Palabras clave:** microperforación, MAP, transporte

## INTRODUCCIÓN

El envasado en atmosfera modificada (MAP) es una de las tecnologías más usadas para extender la vida útil de frutas y hortalizas. Este tipo de envasado es capaz de mantener la calidad del producto si la temperatura y la composición gaseosa se seleccionan adecuadamente (en general, niveles bajos de O<sub>2</sub> y moderados de CO<sub>2</sub>) (Belay *et al.*, 2016). Por ello, los sistemas MAP tienen el reto de adaptar la composición gaseosa del interior del envase a los requerimientos de cada producto, considerando el intercambio de gas a través del envase, y la tasa de respiración del producto envasado. Sin embargo, no siempre se consigue una atmósfera de envasado óptima, fundamentalmente debido a que la permeabilidad al CO<sub>2</sub> de los materiales de envasado es entre 3 y 6 veces mayor que la del O<sub>2</sub> (Singh y Singh, 2005), mientras que la relación entre la producción de CO<sub>2</sub> y el consumo de O<sub>2</sub>, en productos frescos, se encuentra

normalmente entre 0.7 y 1.3 (Kader *et al.*, 1989). Por ello, es fácil que se alcancen condiciones de anaerobiosis, favoreciendo los procesos fermentativos. Una alternativa para solucionar estos problemas es el uso de envases microperforados. Estos tipos de envases permiten el intercambio de gases reduciendo la relación de transferencia  $\text{CO}_2/\text{O}_2$  (González *et al.*, 2008). En el desarrollo de la composición gaseosa de los envases microperforados están involucrados numerosos factores además de los que dependen del propio producto (cinética respiratoria, cantidad envasada...) como son: temperatura y humedad relativa (Del-Valle *et al.*, 2003), número y diámetro de las perforaciones (Castellanos *et al.*, 2016; Chung *et al.*, 2003; Del-Valle *et al.*, 2003; González-Buesa *et al.*, 2009; Sousa-Gallagher y Mahajan, 2013; Winotapun *et al.*, 2023; Xanthopoulos *et al.*, 2012), distribución de las mismas (Giannoulis *et al.*, 2017; Ramos *et al.*, 2019), velocidad del aire en el exterior del envase (Sonawane *et al.*, 2022) y flujo convectivo a través de la perforación (González-Buesa y Salvador, 2022), entre otras.

Los cambios de presión en el interior de los sistemas MAP suelen deberse a las diferencias entre el consumo de oxígeno y la producción de dióxido de carbono que tienen su origen en el metabolismo respiratorio, el desequilibrio entre la permeación de los gases a través del envase, la condensación de la humedad en el interior del envase o la absorción de gases en el interior del producto. Estas variaciones de presión también pueden estar motivadas por factores externos, como los cambios meteorológicos, mareas atmosféricas o variaciones de temperatura y altitud durante el transporte. Durante el transporte de sistemas MAP, los productos pueden estar sujetos a varios de estos factores y, por lo tanto, la presión dentro y fuera del envase evoluciona continuamente como se ha descrito recientemente en el estudio de Vega-Diez *et al.*, (2024). Por lo tanto, considerar la presión o las variaciones de presión, en determinadas condiciones, puede ser relevante, a pesar de lo cual hasta ahora no se ha considerado en el modelado de sistemas MAP. En envases microperforados o con canales, estas diferencias de presión entre ambos lados del envase se compensan por un flujo convectivo a través de la perforación, causando una distribución de concentraciones de gases alrededor del orificio, que difieren del que existe en el resto del envase. La magnitud del campo de velocidades en el flujo de aire que atraviesa la perforación puede ser especialmente alta en el caso de los envases microperforados (diámetro de perforación entre 50 y 300  $\mu\text{m}$ ). Este flujo convectivo a través de la perforación ha sido incluido en algunos de los modelos matemáticos desarrollados (Del-Valle *et al.*, 2003; González-Buesa *et al.*, 2009; Paul y Clarke, 2002; Rennie y Tavoularis, 2009). Sin embargo, muy pocos modelos consideran la dependencia espacial de la concentración de gases en el espacio de cabeza del envase; algunas excepciones son el modelo desarrollado por González-Buesa y Salvador (2022), el de Rennie y Tavoularis (2009), aplicado a conductos, o el de Giannoulis *et al.*, (2017) que no incluye el flujo convectivo.

Por lo tanto, los principales objetivos de este trabajo fueron: i) verificar experimentalmente que los cambios en la presión atmosférica afectan el transporte de gas a través de un envase microperforado; ii) predecir mediante un modelo matemático cómo los cambios de presión afectan al intercambio de gas a través de un envase microperforado; iii) desarrollar un sistema experimental que permita reproducir en un ambiente controlado los cambios de presión que se generan durante el transporte y registrar la evolución de la composición gaseosa en un envase microperforado sometido a estos cambios.

## **MATERIAL y MÉTODOS**

### **Sistema experimental**

Se ha utilizado un sistema experimental similar al descrito por González-Buesa *et al.*, (2022), Figura 1. El sistema consta de dos módulos. El módulo de intercambio de gases está formado por dos cámaras de vidrio. En la superior se establece un flujo continuo de 100 mL

min<sup>-1</sup> de una mezcla de 20.95% CO<sub>2</sub>-0.05 % O<sub>2</sub>-79 % N<sub>2</sub>. La cámara inferior tiene una capacidad de 1250 mL, inicialmente contiene aire y en su interior dispone de un sensor de CO<sub>2</sub> (K33 ICB 30%, Senseair, Sweden). Ambas cámaras están conectadas por una microperforación de 48.6 μm de radio, situada entre ellas. El módulo para monitorizar la presión es similar a la cámara inferior del módulo de intercambio de gases y en su interior se sitúa un sensor para medir la diferencia de presiones entre el interior del módulo y el exterior (AMS 5915-020-D-B, Analog Microelectronics, Germany). El sistema tiene también un sensor para monitorizar la presión atmosférica (AMS 5915-1200-B, Analog Microelectronics, Germany). Los datos se transmiten a través de un Arduino UNO (Arduino, Italy Arduino SRL, Strambino, Italy) a un ordenador usando un software CoolTermWin (Roger Meier, CA, USA).

### Modelo matemático

El modelo matemático desarrollado previamente por Vega-Diez *et al.*, (2024) se ha aplicado en este trabajo incorporando algunas adaptaciones. Este modelo permite describir el intercambio gaseoso a través de una perforación acoplado los fenómenos de transferencia de materia y transporte de cantidad de movimiento. El transporte de masa incluye los mecanismos de convección y difusión, y la fracción másica de los diferentes gases  $\omega_i$  fue descrita mediante el uso de las ecuaciones de Maxwell-Stefan.

$$\rho \frac{\partial \omega_i}{\partial t} + \nabla \cdot \left( -\rho \omega_i \sum_{j=1}^n D_{ij} \left( \nabla x_j + (x_j - \omega_j) \frac{\nabla p}{p} \right) \right) = -\rho u \nabla \omega_i \quad (1)$$

Donde  $t$  es el tiempo,  $x_j$  es la fracción molar de las especies  $j$ ,  $D_{ij}$  es la matriz de difusividad multicomponente de Fick,  $p$  es la presión,  $u$  es el vector de velocidad y  $\rho$  es la densidad, calculada mediante la ley de gases ideales.

$$\rho = \frac{p}{RT} \left( \sum_i^n x_i M_i \right) \quad (2)$$

Donde  $M_i$  es el peso molecular de las especies  $i$ ,  $R$  es la constante de gases, y  $T$  es la temperatura.

Los coeficientes de difusión de gases binarios para un par de gases  $ij$ ,  $D_{ij}$ , son los recomendados por Massman (1998), asumiendo la dependencia de temperatura y presión.

$$D_{ij} = D_{ij}(T_o, p_o) \left( \frac{p_o}{p} \right) \left( \frac{T}{T_o} \right)^{1.81} \quad (3)$$

El transporte de cantidad de movimiento se describió mediante la ecuación de Navier-Stokes, para un flujo newtoniano compresible:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left( \mu (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla u) I \right) + F \quad (4)$$

Donde  $I$  es la matriz identidad y  $\mu$  es la viscosidad dinámica, calculada como la media ponderada con las fracciones molares,  $x_i$ , de las viscosidades de los componentes individuales,  $\mu_i$ :

$$\mu = \sum_{i=1}^n x_i \mu_i \quad (5)$$

Asumiendo la temperatura como constante y considerando la fuerza volumétrica, la viscosidad dilatacional y las fuerzas externas,  $F$ , iguales a cero, la ecuación (4) se convierte en:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left( \mu(\nabla u) - \frac{2}{3} \mu(\nabla u) I \right) \quad (6)$$

Estas ecuaciones se resolvieron junto con la ecuación de continuidad que representa la conservación de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (7)$$

Estas ecuaciones (1 a 7) se implementaron en un modelo computacional usando el software COMSOL Multiphysics® v6.2. Concretamente usando los módulos de transporte concentrado de especies y flujo laminar.

El sistema modelado corresponde con el módulo de intercambio de gases del sistema experimental. Debido a su geometría rotacional, las simulaciones se realizaron en una sección estrecha de un grado. Se establecieron tres dominios: cámara superior, una cámara inferior que representaría y la perforación situada entre ambas. Las condiciones iniciales del sistema fueron: una concentración de 20.95% CO<sub>2</sub>-0.05 %O<sub>2</sub>-79% N<sub>2</sub> en la cámara superior, 0.05% CO<sub>2</sub>-20.95% O<sub>2</sub>-79% N<sub>2</sub> en la cámara inferior, y 0.105% CO<sub>2</sub>-0.105% O<sub>2</sub>-79% N<sub>2</sub> en la perforación. Se establecieron en la cámara superior una condición de contorno de entrada de una mezcla de gases de igual composición que la inicial en la cámara y una de salida; ambas a presión barométrica (Figura 2). Para resolver las ecuaciones se seleccionó un estudio dependiente del tiempo, con 15150 grados de libertad, y un *solver* completamente acoplado.

La geometría del sistema consta de un dominio con tamaño de micras (perforación) mientras que los otros dominios lo tienen de varios centímetros. Estas diferencias en las dimensiones pueden generar singularidades y errores de cálculo, por lo que seleccionar una malla adecuada es una tarea crucial. Se realizó un estudio de sensibilidad del mallado, optimizando el número de elementos de malla y reduciendo el coste computacional, sin comprometer al resultado final. Para el proceso de mallado se comenzó definiendo la perforación y luego el mallado se amplió a las cámaras, obteniendo una malla de 2464 elementos, con una calidad media de 0.8373 (siendo la máxima posible 1). El histograma de la distribución de la calidad de los elementos de la malla se encuentra en la **Figura 3**.

La evolución de la composición gaseosa en la cámara inferior del módulo de intercambio se simuló para dos situaciones en las que había cambios de presión: a) cambios debidos a fluctuaciones en la presión atmosférica por las condiciones meteorológicas registrados experimentalmente, b) cambios de presión motivados por los cambios de altitud durante un transporte aéreo en la ruta Barcelona-Berlín. Los datos de presión durante el vuelo fueron registrados experimentalmente mediante un sensor de presión (EL-SIE-6+ EasyLog, UK).

## RESULTADOS y DISCUSIÓN

En la

**Figura 4a** se representa los resultados obtenidos cuando los cambios de presión son debidos a fluctuaciones en la presión atmosférica. Como puede apreciarse durante 96 h se recogieron cambios de presión que oscilaron en un intervalo de 10 mbar. Los cambios bruscos en la presión se corresponden con pequeños cambios apenas perceptibles en la evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> medida experimentalmente. Las variaciones de presión se introdujeron en el modelo como condición de contorno para la cámara superior del sistema. La evolución de CO<sub>2</sub> predicha por el modelo, considerando las fluctuaciones en la presión atmosférica, para un punto suficientemente alejado de la perforación para evitar la influencia de los gradientes que se producen en su entorno, se muestran también en la Figura 4a. Los resultados así obtenidos

indican una muy buena concordancia entre los datos experimentales y los simulados. En la Figura 4b se muestran los cambios de presión medidos experimentalmente durante un trayecto en avión. Estos datos también se introdujeron como condición de contorno de la cámara superior del sistema experimental. La evolución del CO<sub>2</sub> predicha por el modelo cuando se tienen en cuenta los cambios de presión durante el transporte y omitiéndolos son muy diferentes. Al final del trayecto, la concentración de CO<sub>2</sub> en un caso y otro es del 5.2% y del 0.20%, respectivamente. Estos resultados concuerdan con lo descrito en el artículo de Vega-Díez *et al.*, (2024) y de ellos se infiere que los cambios de presión que puede sufrir un producto en un envase microperforado, es un factor que afecta significativamente a la concentración de gases en el interior del envase, y por lo tanto se puede considerar una variable a tener en cuenta para diseñar envases MAP microperforados de manera más precisa y adaptados a entornos de conservación variables.

Con el sistema experimental utilizado para verificar los resultados del modelo cuando los cambios de presión son debidos a fluctuaciones en la presión atmosférica, es imposible verificar lo que sucede durante un transporte aéreo en el que los cambios de presión son del orden de 20 kPa. Por ello, se hace necesario el diseñar un sistema experimental que permita reproducir estos cambios de presión. El sistema está compuesto por una cámara en la que se variaría la presión siguiendo una pauta preestablecida por las condiciones de transporte. En dicha cámara se puede introducir aire a presión atmosférica o aire a presión reducida procedente de un reservorio de aire a baja presión conectado a una bomba de vacío (Standard Duty WOB-L-2581, Welch, Reino Unido). La cámara dispone de un sensor de presión (PAA-23SY, Keller, Suiza) y dos electroválvulas (una de ellas de tipo proporcional) conectados a un controlador, y un ordenador en donde se registra la presión en la cámara de vacío y las aperturas/cierres de las electroválvulas. Para controlar las variaciones de presiones se desarrolló un programa propio utilizando el software Labview, con una desviación 1mbar entre el valor deseado de la presión y el medido. En el interior de la cámara de vacío hay 5 botes herméticos de vidrio de 825mL que intercambian gases con el exterior de los mismos sólo a través de una microperforación de 6900  $\mu\text{m}^2$ . Cada uno de los botes dispone de un sensor de CO<sub>2</sub> (K33 ICB 30%, Senseair, Suecia). El sistema también tiene un sensor de presión diferencial (AMS 5915-050-D-B) y un sensor de presión absoluta (AMS 5915-1200-B, Analog Microelectronics, Alemania). Para tener el control del tiempo, se hizo uso de un reloj (DS3231, AdaFruit, Estados Unidos). Los cinco botes estaban conectados por un tubo de poliamida (impermeable al CO<sub>2</sub>) para poder hacer un barrido en serie con una mezcla de gases de composición 20.95% CO<sub>2</sub>-0.05% O<sub>2</sub>-79% N<sub>2</sub>. Los sensores están conectados a una placa de Arduinio MEGA (Arduino, Italia), al ser cinco los sensores que emiten en la misma dirección se hizo uso de varios multiplexores para diferenciar las señales recibidas, y poder registrar los datos de forma secuencial en el ordenador. En la Figura 5 se puede observar que la presión en la cámara registra por el sensor sigue adecuadamente la trayectoria requerida. En la figura también se representa la respuesta de las electroválvulas: cuando la presión desciende, la electroválvula de tipo proporcional se pone en funcionamiento, extrayendo aire de la cámara de tratamiento. En la fase de meseta a bajas presiones, el sistema es capaz de mantener esos niveles de baja presión, gracias a la estanqueidad del sistema. Si existiera alguna fuga se activaría la electroválvula y volvería hacer vacío. Cuando la presión aumenta actúa la otra electroválvula, permitiendo la entrada de aire en la cámara. En la prueba de estanqueidad se obtuvieron valores de pérdida de concentración de CO<sub>2</sub> del orden de 2500-3000 ppm a las 90 h. Como estos datos están dentro del orden de magnitud de la precisión de los sensores de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, se puede establecer que el sistema experimental y el software desarrollado, son herramientas con las que poder reproducir perfiles de presión en un ambiente controlado.

## CONCLUSIONES

El modelo matemático desarrollado resuelve acopladamente la transferencia de masa y el transporte de cantidad de momento, mediante las ecuaciones de Maxwell-Stefan y Navier Stokes, y que considera la dependencia espacio-temporal de la concentración, siendo capaz de predecir adecuadamente el intercambio de gas a través de una microperforación cuando existen pequeñas fluctuaciones de presión atmosférica. Sin embargo, cuando existen cambios de altitud acusados, como los que tienen lugar durante el transporte aéreo o terrestre, es necesario recurrir a un sistema experimental que cubra unos rangos y variaciones de presión más elevados. Las simulaciones revelaron la importancia de considerar estos cambios de presión para diseñar adecuadamente los sistemas MAP microperforados, ya que si no se tienen en cuenta la atmósfera generada en el interior del envase no concordaría con los valores reales. En futuros trabajos se verificarán los resultados del modelo y se adaptará para incluir la presencia del alimento en el envase como un flujo que simule el provocado por la respiración del producto.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España (proyecto PID2022-142850OR-100) y beca predoctoral PREP 2022-000492 para Sara Vega-Diez.

## REFERENCIAS

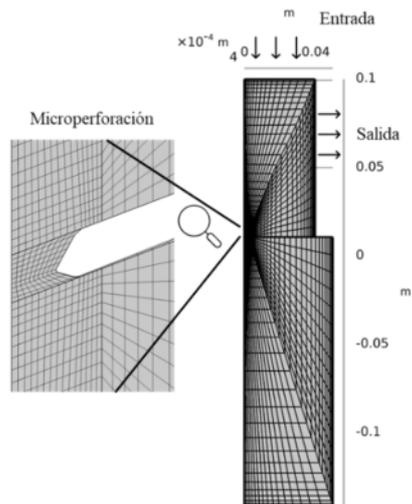
- Belay, Z. A., Caleb, O. J., Opara, U. L. (2016). Modelling approaches for designing and evaluating the performance of modified atmosphere packaging (MAP) systems for fresh produce: A review. *Food Packaging and Shelf Life*, 10, 1–15.
- Castellanos, D. A., Cerisuelo, J. P., Hernandez-Muñoz, P., Herrera, A. O., Gavara, R. (2016). Modelling the evolution of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> concentrations in MAP of a fresh product: Application to tomato. *Journal of Food Engineering*, 168, 84–95.
- Chung, D., Papadakis, S. E., Yam, K. L. (2003). Simple models for evaluating effects of small leaks on the gas barrier properties of food packages. *Packaging Technology and Science*, 16(2), 77–86.
- Del-Valle, V., Almenar, E., Lagarón, J. M., Catalá, R., Gavara, R. (2003). Modelling permeation through porous polymeric films for modified atmosphere packaging. *Food Additives and Contaminants*, 20(2), 170–179.
- Giannoulis, A., Mistriotis, A., Briassoulis, D. (2017). 3D numerical simulations as optimization tool for the design of novel EMAP systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 119–129.
- González, J., Ferrer, A., Oria, R., Salvador, M. L. (2008). Determination of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> transmission rates through microperforated films for modified atmosphere packaging of fresh fruits and vegetables. *Journal of Food Engineering*, 86(2), 194–201.
- González-Buesa, J., Ferrer-Mairal, A., Oria, R., Salvador, M. L. (2009). A mathematical model for packaging with microperforated films of fresh-cut fruits and vegetables. *Journal of Food Engineering*, 95(1), 158–165.
- González-Buesa, J., Salvador, M. L. (2022). A multiphysics approach for modeling gas exchange in microperforated films for modified atmosphere packaging of respiring products. *Food Packaging and Shelf Life*, 31.
- Kader, A. A., Zagory, D., Kerbel, E. L., Wang, C. Y. (1989). Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 28(1), 1–30.

- Massman, W. J. (1998). A review of the molecular diffusivities of H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, and NO<sub>2</sub> in air, O<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> near STP. *Atmospheric Environment*, 32(6), 1111–1127.
- Paul, D. R., Clarke, R. (2002). Modeling of modified atmosphere packaging based on designs with a membrane and perforations. *Journal of Membrane Science*, 208(1–2), 269–283.
- Ramos, A. V., Sousa-Gallagher, M. J., Oliveira, J. C. (2019). Effect of Hydrodynamic Conditions and Geometric Aspects on the Permeance of Perforated Packaging Films. *Food and Bioprocess Technology*, 12(9), 1527–1536.
- Rennie, T. J., Tavoularis, S. (2009). Perforation-mediated modified atmosphere packaging. Part I. Development of a mathematical model. *Postharvest Biology and Technology*, 51(1), 1–9.
- Singh, R. K., Singh, N. (2005). Quality of packaged foods. In *Innovations in Food Packaging* (pp. 24–44). Elsevier.
- Sousa-Gallagher, M. J., Mahajan, P. V. (2013). Integrative mathematical modelling for MAP design of fresh-produce: Theoretical analysis and experimental validation. *Food Control*, 29(2), 444–450.
- Vega-Diez, S., Salvador, M. L., González-Buesa, J. (2024). Effect of atmospheric pressure changes on gas transmission through microperforated packages of respiring products. *Journal of Food Engineering*, 375.
- Winotapun, C., Issaraseree, Y., Sirirutbunkajal, P., Leelaphiwat, P. (2023). CO<sub>2</sub> laser perforated biodegradable films for modified atmosphere packaging of baby corn. *Journal of Food Engineering*, 341, 111356.
- Xanthopoulos, G., Koronaki, E. D., Boudouvis, A. G. (2012). Mass transport analysis in perforation-mediated modified atmosphere packaging of strawberries. *Journal of Food Engineering*, 111(2), 326–335.

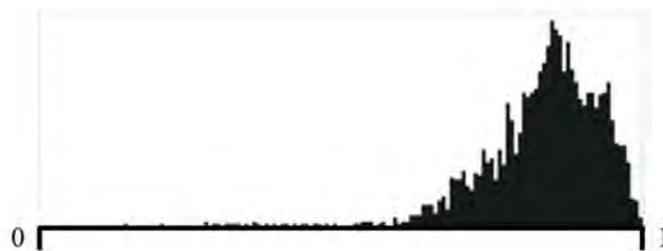
## FIGURAS



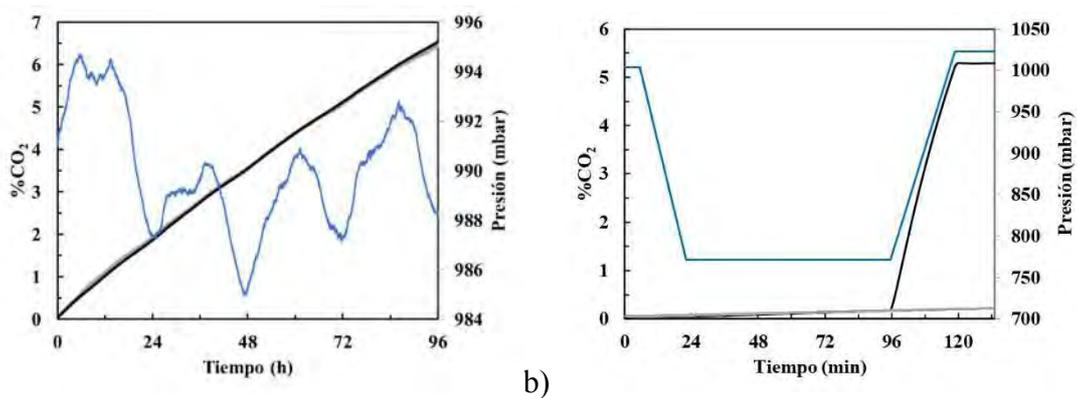
**Figura 1.** Diagrama del montaje experimental construido para medir el intercambio de CO<sub>2</sub> a través de una microperforación y los cambios de presión atmosférica.



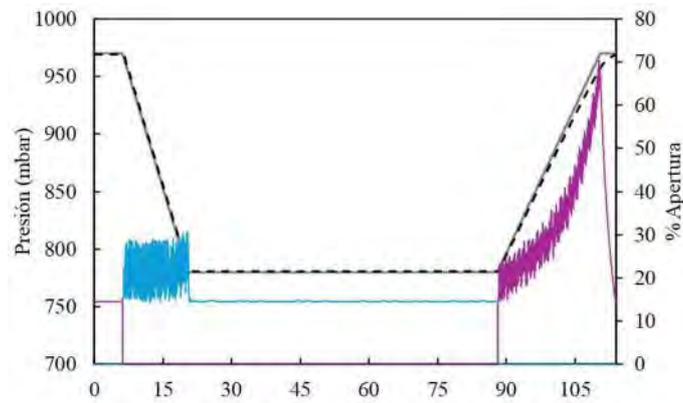
**Figura 2.** Condiciones de contorno del modelo matemático, y visualización del mallado. Detalle de la perforación



**Figura 3.** Histograma de la distribución de calidad de elementos de malla.



**Figura 4.** a) Evolución del CO<sub>2</sub> con presión atmosférica; línea azul perfil de presión atmosférica, línea gris % CO<sub>2</sub> experimental, línea negra % CO<sub>2</sub> predicho por el modelo, b) Evolución del CO<sub>2</sub> en un vuelo: línea azul perfil de presión del vuelo, línea gris % CO<sub>2</sub> con presión constante; línea gris % CO<sub>2</sub> con perfil de presión.



**Figura 5.** Datos registrados por el software de control de presión: línea gris perfil de presión introducido en el programa; línea discontinua negra valor de presión del interior de la cámara; línea azul % apertura de la electroválvula encargada de hacer vacío en la cámara; línea morada % apertura de la electroválvula encargada de introducir aire atmosférico en la cámara.