

Modelado del intercambio gaseoso en envases microperforados de productos hortofrutícolas: límites en el diseño para evitar el colapso

S., Vega-Diez^{1,2}, M.L., Salvador², J., González-Buesa^{1,2}.

¹Departamento 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, España.

²Grupo de Investigación en Alimentos de Origen Vegetal, Universidad de Zaragoza, Instituto Agroalimentario de Aragón-IA2 (Universidad de Zaragoza-CITA), Miguel Servet 177, 50013, Zaragoza, España. svega@cita-aragon.es

Introducción

El envasado en atmósfera modificada (MAP) es una de las tecnologías más comunes para mantener la calidad y la seguridad en frutas y hortalizas frescas o mínimamente procesadas. La atmósfera obtenida en los envases MAP depende de una gran variedad de factores, incluyendo la tasa de respiración del producto y la tasa de transmisión del envase. Para conseguir aumentar el intercambio gaseoso en los envases de productos con una alta tasa de respiración, se pueden utilizar envases microperforados.

El desarrollo de modelos matemáticos es una herramienta útil para el diseño de envases MAP ya que permite integrar los factores implicados (temperatura, tasa de respiración, cantidad de producto, volumen libre, tamaño de la perforación), y predecir la evolución de la composición gaseosa en el envase. La mayoría de los modelos no contemplan la dependencia espacial de la composición gaseosa en el envase. Sin embargo, su consideración permite un análisis más detallado del intercambio gaseoso, pudiendo analizar la influencia de la forma y del área efectiva de las microperforaciones, ya que dependen de la tecnología de fabricación.

Objetivo

Aplicar un modelo matemático computacional por elementos finitos en 3D que considera la dependencia espacio-temporal de la composición gaseosa en el interior de un envase microperforado. De esta forma, se pretende determinar cómo varía el flujo convectivo a través de una microperforación y la presión interna en el envase en función de la cinética respiratoria del producto y de las dimensiones de la microperforación.

Materiales y métodos

- Modelo basado en el desarrollado por Vega-Diez et al. (2024)

- Implementado en COMSOL Multiphysics® software
- Intercambio gaseoso a través de una microperforación se ha considerado como un caso transitorio de transferencia de masa acoplada al transporte de cantidad de movimiento.
- El transporte de masa incluye los fenómenos de convección y difusión y se ha descrito mediante la ecuación de Maxwell-Stefan
- Para el transporte de cantidad de movimiento se ha utilizado la ecuación de Navier-Stokes para flujo newtoniano compresible.

Para analizar la influencia del tamaño de la perforación en la presión en el interior de un envase rígido (1250 mL), se seleccionaron perforaciones, desde un radio de 48 μm hasta 1.5 μm . Se realizaron simulaciones para los productos frescos indicados en la Tabla 1. Las cinéticas respiratorias se obtuvieron en un respirómetro como el mostrado en la Figura 2.

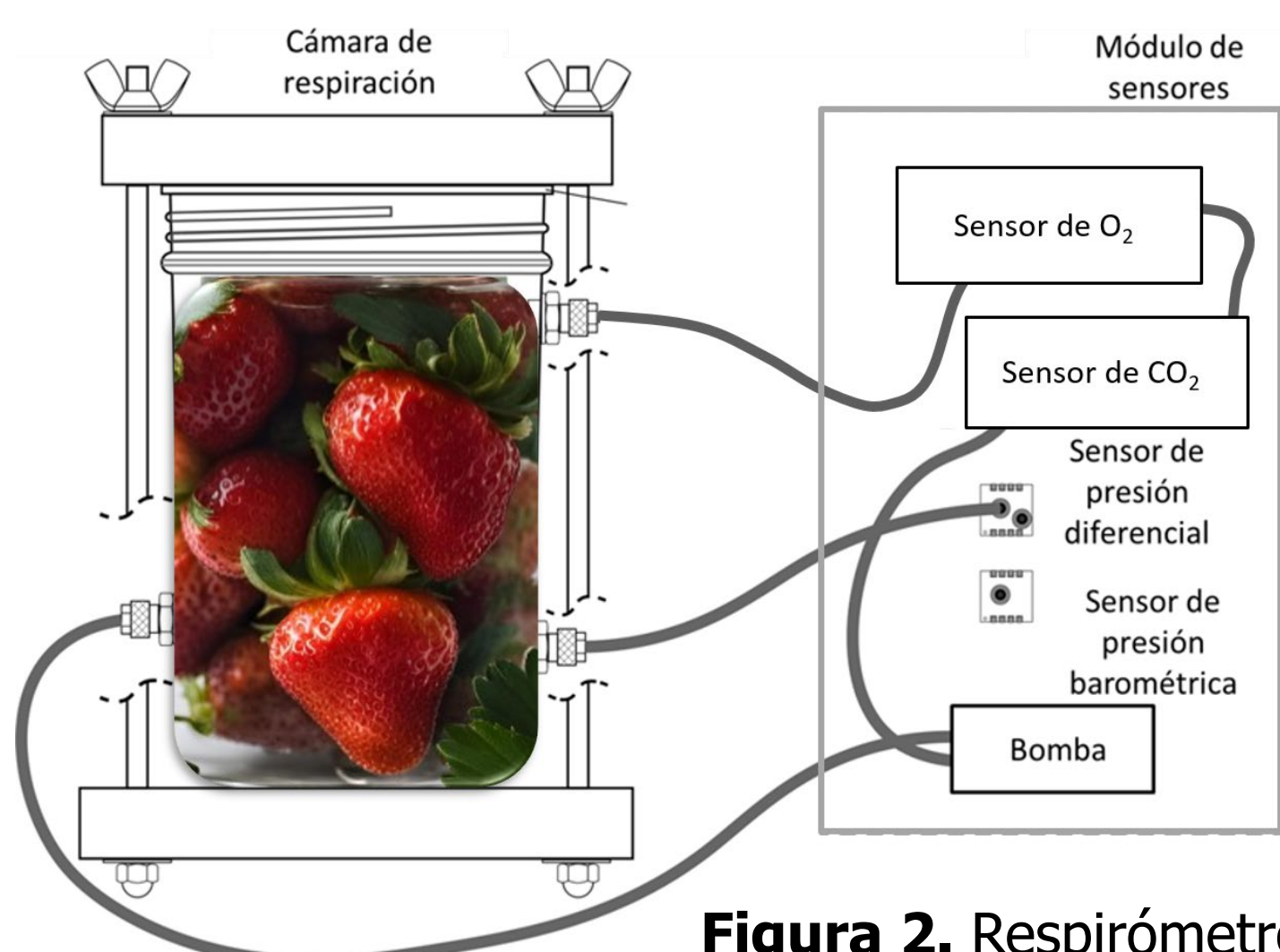


Figura 2. Respirómetro

Tabla 1. Velocidades de respiración (a 4 °C)

| Producto | Cantidad (g) | RO ₂ (mL kg ⁻¹ h ⁻¹) | RCO ₂ (mL kg ⁻¹ h ⁻¹) |
|----------|--------------|--|---|
| Aguacate | 423±5 | 8.88±1.41 | 4.88±0.98 |
| Arándano | 500±1 | 3.31±0.27 | 2.09±0.07 |
| Brócoli | 204±2 | 24.61±3.15 | 16.31±1.55 |
| Fresa | 381±3 | 8.58±0.29 | 5.91±0.29 |
| Manzana | 459±38 | 1.88±0.23 | 1.14±0.50 |

Fuente: González-Buesa & Salvador (2022)

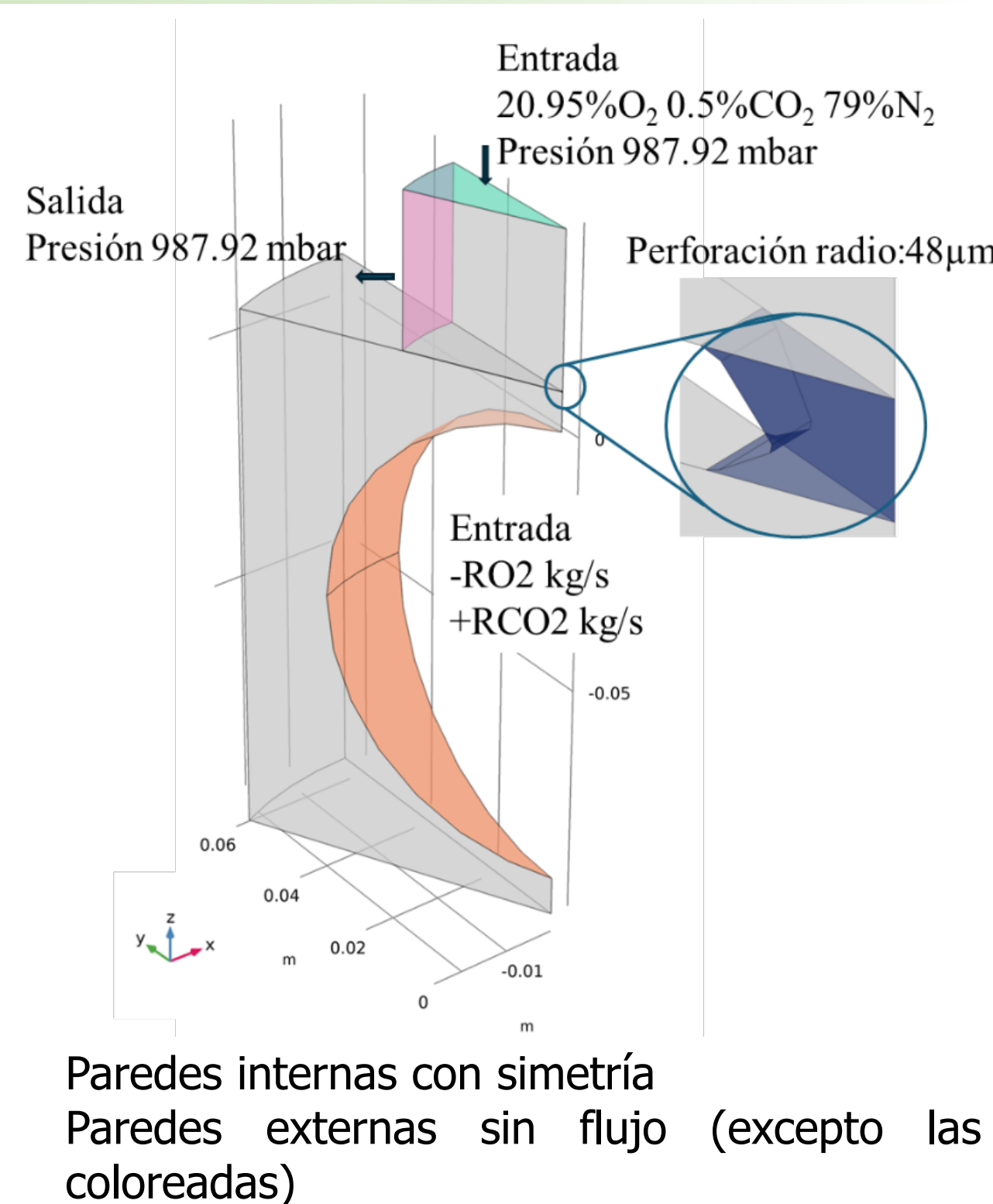


Figura 1. Condiciones de contorno

Resultados

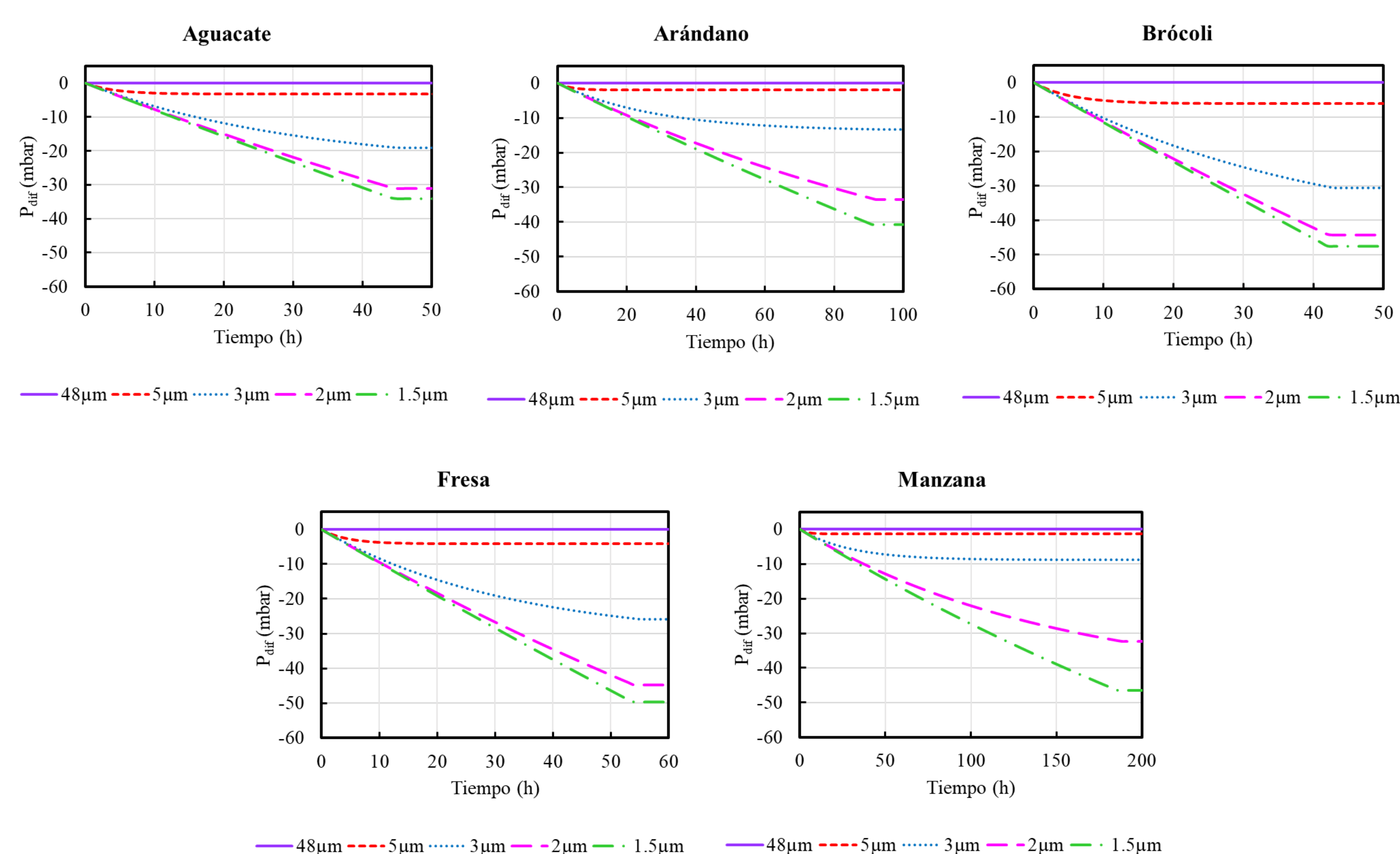


Figura 3. Evolución de la presión diferencial (Pdif) en el interior del envase para cada uno de los productos con diferentes radios de perforación.

Las caídas de presión en el interior de los envases (Pdif) generadas por la respiración de los diferentes productos (cocientes respiratorios <1), y no compensadas por el flujo convectivo a través de la perforación, se muestran en la Figura 3 para diferentes productos y radios de perforación. Los valores de Pdif se obtuvieron como diferencia entre la presión promedio en el envase y la presión inicial. A partir de estos datos se deduce que:

- Para un mismo producto, la presión desciende más acusadamente y tarda más tiempo en estabilizarse cuanto más pequeño es el tamaño de la perforación. En todos los casos, con una perforación de 48 μm , la presión en el envase tan apenas cambia ya que la entrada de aire a través de la perforación es suficiente como para compensar el descenso de presión originado por la actividad respiratoria.
- Cuanto mayor es la tasa de respiración del producto se requieren tamaños de perforación más grandes para evitar un declive significativo en la presión dentro del envase. En el caso de la manzana, que tiene la menor tasa de respiración, con una perforación de 3 μm la presión se equilibra tras una ligera caída (-7 mbar). Sin embargo, para el brócoli que tiene la mayor velocidad de respiración de los productos testados, el intercambio gaseoso a través de la perforación de 3 μm no consigue frenar el descenso de la presión antes de que se alcancen condiciones de anaerobiosis, disminuyendo la presión 30 mbar con respecto a la atmosférica
- Si el descenso de la presión dentro del envase es notable, existe el riesgo de generarse una deformación en el envase, provocar un colapso, o incluso la rotura del envase.
- Dado que el uso de envases biobasados es previsible que se generalice en los próximos años y que algunos de estos materiales presentan una baja permeabilidad al oxígeno (por ejemplo, el ácido poliláctico o la celulosa), su aplicación en el envasado MAP de frutas y hortalizas frescas o mínimamente procesadas requerirá el uso de microperforaciones. Sin embargo, el desarrollo de microperforaciones con características concretas para lograr la composición gaseosa adecuada es un reto.
- El presente estudio proporciona información útil para comprender la influencia del tamaño de una perforación en el intercambio gaseoso en sistemas MAP y que podría utilizarse para optimizar las tecnologías de fabricación de microperforaciones.

Conclusiones

El modelo 3D desarrollado predice adecuadamente el intercambio de gas a través de una microperforación considerando la dependencia espacio-temporal de la composición gaseosa. Las dimensiones de la perforación afectan a la dinámica de intercambio de gas. Conocer qué tamaño mínimo se puede usar sin que se produzca el colapso del envase es de gran utilidad para el desarrollo de envases MAP optimizados para los requerimientos específicos de conservación de cada producto fresco o mínimamente procesado.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España (PID2019-108080RR-100) y beca predoctoral PREP 2022-000492 para Sara Vega-Diez.



Referencias

- 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, 100797
- 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, 112060