

Efecto combinado de la luz UV-C y envases activos con citral y carvacrol sobre hojas de rúcula “baby”

Combined effect of UV-C light and active packaging containing citral and carvacrol on “baby” arugula leaves

Efeito combinado da luz UV-C e de embalagem ativa contendo citral e carvacrol em folhas de rúcula “baby”

Luna Inca Ruth Isabel¹
Universidad de Chile

rl.empresa.ec@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-6543-0554>



Char Cielo Dolores²
Universidad de Chile

cchar@cid.uchile.cl

<https://orcid.org/0000-0001-7796-0366>



Abrajan Velasco Paulina Maribel³
Universidad México

info@max-farmer.com

<https://orcid.org/0009-0005-6184-1190>



 DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v7/n1/1606>

Como citar:

Luna Inca, R, I., Char, C, D. & Abrajan Velasco, P, M, (2026). Efecto combinado de la luz UV-C y envases activos con citral y carvacrol sobre hojas de rúcula “baby”. *Código Científico Revista de Investigación*, 7(1), 3243–3265.

Recibido: 18/05/2026

Aceptado: 19/06/2026

Publicado: 30/06/2026

Resumen

La demanda de hortalizas de cuarta gama impulsa el desarrollo de empaques activos que combinen desinfección física y antimicrobianos naturales como alternativa a los conservantes sintéticos. Este estudio evaluó el efecto combinado de la radiación UV-C, atmósferas modificadas pasivas y la liberación controlada de citral y carvacrol en la conservación de rúcula (*Eruca sativa*) “baby” durante 9 días a 5 °C. Las hojas se pretrataron con UV-C (10 kJ m⁻², 4 min) y se envasaron en bolsas de baja permeabilidad con *sachets* activos de 150 µL de citral (150Ci), 75 µL de carvacrol (75Ca) o su combinación (150Ci+75Ca). Se incluyeron testigos en bolsas perforadas (BP) y con UV-C puro. Durante el almacenamiento, el espacio de cabeza alcanzó un equilibrio con 1% de O₂ y 8% de CO₂. Llegando a concluir que todos los tratamientos activos disminuyeron la carga microbiológica nativa. La combinación sinérgica 150Ci+75Ca fue la más eficaz, logrando reducciones máximas frente al control de 1.6 log UFC/g en aerobios mesófilos, 2.2 log en psicrótrofos y hasta 3.4 log en enterobacterias y *Escherichia coli*. Aunque *E. coli* proliferó en la fase terminal debido a su naturaleza anaerobia facultativa, el tratamiento mixto garantizó la inocuidad general y extendió la vida útil sanitaria hasta por 6 días. Fitoquímicamente, este sistema funcionó como un estímulo que indujo un incremento y retención de los fenoles totales a partir del día tres. Esto preservó la capacidad antioxidante y protegió la vitamina C frente a la degradación por senescencia del testigo BP. En conclusión, esta tecnología de barreras combinadas no solo preservó la calidad microbiológica de la rúcula, sino que potenció sus compuestos benéficos para la salud.

Palabras clave: antimicrobianos naturales; citral; carvacrol; luz UV-C; rúcula; envases activos.

Abstract

The demand for fresh-cut vegetables drives the development of active packaging that combines physical disinfection and natural antimicrobials as an alternative to synthetic preservatives. This study evaluated the combined effect of UV-C radiation, passive modified atmospheres, and the controlled release of citral and carvacrol on the preservation of baby arugula (*Eruca sativa*) for 9 days at 5 °C. Leaves were pretreated with UV-C (10 kJ m⁻², 4 min) and packed in low-permeability bags containing active sachets with 150 µL of citral (150Ci), 75 µL of carvacrol (75Ca), or their combination (150Ci+75Ca). Control groups included perforated bags (PB) and pure UV-C treatments. During storage, the headspace reached an equilibrium of 1% O₂ and 8% CO₂. Leading to the conclusion that all active treatments reduced the native microbiological load. The synergistic 150Ci+75Ca combination was the most effective, achieving maximum reductions compared to the control of 1.6 log CFU/g in mesophilic aerobes, 2.2 log in psychrotrophs, and up to 3.4 log in enterobacteria and *Escherichia coli*. Although *E. coli* proliferated in the final stage due to its facultative anaerobic nature, the mixed treatment guaranteed overall safety and extended the microbiological shelf life by up to 6 days. Phytochemically, this system acted as a stimulus that induced an increase and retention of total phenols from day 3. This preserved the antioxidant capacity and protected vitamin C against the senescence-induced degradation observed in the PB control. In conclusion, this hurdle technology not only preserved the microbial quality of arugula but also enhanced its health-beneficial compounds.

Keywords: natural antimicrobials; citral; carvacrol; UV-C light; arugula; active packaging.

Resumo

A demanda por vegetais minimamente processados impulsiona o desenvolvimento de embalagens ativas que combinam desinfecção física com antimicrobianos naturais como alternativa aos conservantes sintéticos. Este estudo avaliou o efeito combinado da radiação UV-C, atmosferas modificadas passivas e a liberação controlada de citral e carvacrol na conservação de rúcula *baby* (*Eruca sativa*) durante 9 dias a 5 °C. As folhas foram pré-tratadas com UV-C (10 kJ m⁻², 4 min) e embaladas em sacos de baixa permeabilidade contendo sachês ativos com 150 µL de citral (150Ci), 75 µL de carvacrol (75Ca) ou uma combinação de ambos (150Ci+75Ca). Os controles incluíram amostras em sacos perfurados (BP) e amostras tratadas apenas com UV-C. Durante o armazenamento, o espaço livre da embalagem (*headspace*) atingiu um equilíbrio de 1% de O₂ e 8% de CO₂. Levando à conclusão que todos os tratamentos ativos reduziram a carga microbiológica nativa. A combinação sinérgica 150Ci+75Ca foi a mais eficaz, alcançando reduções máximas — em relação ao controle — de 1,6 log UFC/g para aeróbios mesófilos, 2,2 log para psicrotróficos e até 3,4 log para *Enterobacteriaceae* e *Escherichia coli*. Embora a *E. coli* tenha proliferado durante a fase final devido à sua natureza anaeróbia facultativa, o tratamento combinado garantiu a segurança geral e prolongou a vida útil sanitária em até 6 dias. Do ponto de vista fitoquímico, esse sistema atuou como um estímulo que induziu o aumento e a retenção de fenóis totais a partir do terceiro dia. Isso preservou a capacidade antioxidante e protegeu a vitamina C contra a degradação associada à senescência observada no controle BP. Em conclusão, essa tecnologia de barreiras combinadas não apenas preservou a qualidade microbiológica da rúcula, mas também potencializou seus compostos benéficos à saúde.

Palavras-chave: antimicrobianos naturais; citral; carvacrol; luz UV-C; rúcula; embalagem ativa.

Introducción

La expansión global del mercado de productos hortofrutícolas mínimamente procesados en fresco (MPF), comúnmente denominados de cuarta gama (*fresh-cut*), responde a una creciente demanda de alimentos saludables, convenientes y listos para el consumo. Estos productos se obtienen mediante operaciones unitarias tales como el lavado, pelado, troceado y envasado. No obstante, dicho procesamiento físico rompe la integridad celular del tejido vivo, induciendo un estrés mecánico que acelera el metabolismo respiratorio, la senescencia y la proliferación de la microbiota nativa. Por consiguiente, el principal desafío tecnológico radica en prolongar la vida útil comercial y garantizar la inocuidad microbiológica, sin comprometer sus atributos de calidad fisicoquímica ni recurrir a conservantes de síntesis química (Escalona et al., 2008).

Dentro de esta categoría, la rúcula (*Eruca sativa*) “baby” de cuarta gama ha experimentado una demanda creciente debido a su denso perfil fitoquímico, caracterizado por un contenido apreciable de fibra, calcio, manganeso, hierro y potasio. Destaca, asimismo, por la presencia de metabolitos secundarios azufrados denominados glucosinolatos. Estos compuestos no solo le confieren su sabor amargo característico, sino que le otorgan propiedades terapéuticas contra la anemia, efectos desintoxicantes, actividad antibiótica directa frente a *Helicobacter pylori* y, recientemente, un marcado interés oncológico debido a sus atributos quimioprotectores (Fahey et al., 2001). No obstante, el almacenamiento postcosecha de estos tejidos foliares tiernos acelera la degradación de los pigmentos de clorofila, la pérdida de compuestos funcionales y la susceptibilidad al deterioro microbiológico.

Para mitigar estas alteraciones y preservar la calidad integral del vegetal, el envasado en atmósfera modificada pasiva (MAP) constituye una de las estrategias más estudiadas. Esta tecnología aprovecha la permeabilidad selectiva del film polimérico a la difusión gaseosa, donde la reducción de las presiones parciales de oxígeno (O₂) y etileno, acoplada al incremento del dióxido de carbono (CO₂) y la humedad relativa, disminuyen la tasa respiratoria, atenúan la transpiración y retrasan el deterioro fisiológico y enzimático (Artés, 2006). Bajo condiciones de equilibrio pasivo óptimo, se busca establecer de forma autónoma concentraciones estables de gases que oscilen entre 2% y 5% de O₂ y entre 3% y 8% de CO₂ dentro del espacio de cabeza del envase (Meneses et al., 2008). Estudios realizados por Torales et al. (2020) señalan que la menor degradación de clorofila en rúcula recién cortada almacenada bajo atmósfera modificada activa (3–5 kPa O₂ + 5–20 kPa CO₂) se debe al retraso en la senescencia y a la menor actividad de la enzima clorofilasa, reduciendo la actividad catalítica y preservando la calidad visual del tejido foliar.

Por otro lado, cuando los sistemas pasivos tradicionales resultan insuficientes para contener la proliferación microbiológica, surge el envasado activo como una estrategia tecnológica de vanguardia. Al respecto, el reglamento del Consejo Europeo define a los envases activos como materiales y objetos diseñados para incorporar intencionalmente componentes que liberan sustancias en el espacio de cabeza o absorben compuestos del alimento y su entorno. El envasado antimicrobiano constituye una vertiente de esta tecnología y puede implementarse mediante la incorporación de agentes volátiles y no volátiles directamente en matrices poliméricas, el revestimiento de superficies, la inmovilización por enlaces iónicos o covalentes, o la adición de dispositivos independientes como *sachets* o almohadillas (Singh et al., 2022). Los antimicrobianos de origen vegetal, tales como los aceites esenciales (AE), destacan por sus notables propiedades antimicrobianas y antioxidantes, representando alternativas ecológicas prometedoras frente a los aditivos sintéticos (Rusková et al., 2023).

Entre estos compuestos activos, el citral es un aldehído monoterpénico con aroma cítrico cuyo uso se ha extendido en la conservación de alimentos debido a sus singulares propiedades biológicas; sin embargo, su inestabilidad frente a factores ambientales exige el desarrollo de sistemas de liberación controlada para mejorar su estabilidad fisicoquímica (Li et al., 2025). Por su parte, el carvacrol es un monoterpeno fenólico que constituye hasta el 80% del AE de orégano (*Origanum vulgare*) y cuenta con la aprobación de la FDA. Al respecto, Gutiérrez et al. (2009) señalaron que los AE de orégano y tomillo (*Thymus vulgaris*) controlan eficientemente la microflora natural en lechuga y zanahoria mínimamente procesadas. La efectividad de estos sistemas ha sido validada en empaques multisistémicos mediante la inclusión combinada de agentes volátiles (cinamaldehído, eugenol y mentol) y absorbentes de humedad, optimizando de forma sostenible la conservación de frutos altamente perecederos como la fresa (Mahecha, 2024).

Como alternativa complementaria de naturaleza física, la radiación ultravioleta (UV) ha surgido como una tecnología no térmica idónea para extender la vida útil de productos frescos resguardando su calidad nutricional. La radiación UV, categorizada en UVA (320–400 nm), UVB (280–320 nm) y UVC (200–280 nm), induce respuestas fisiológicas y bioquímicas en los tejidos vegetales que afectan el metabolismo postcosecha. Específicamente, la luz UV-C (alrededor de 254 nm) es ampliamente utilizada para la desinfección de frutas y verduras debido a su eficacia para mitigar la carga microbiana (Kibar & Kibar, 2025). Estudios recientes demuestran que dosis moderadas de UV-C disminuyen las poblaciones de mesófilos y psicrotrofos, retrasando la degradación del color y reteniendo la actividad antioxidante en hojas frescas bajo MAP. No obstante, Benites et al. (2025) advirtieron que, si bien tratamientos con UV-C (5 a 50 kJ/m²) mitigan temporalmente el crecimiento microbiano, la tecnología por sí sola resulta insuficiente para prevenir el incremento significativo de bacterias mesófilas hacia el final del almacenamiento.

Esta evidencia pone de manifiesto las limitaciones de cada técnica cuando se aplican de forma individual: los antimicrobianos naturales volátiles pueden perder eficacia rápidamente por difusión o alterar las propiedades organolépticas del producto, mientras que la luz UV-C carece de un efecto residual prolongado. En consecuencia, se requiere profundizar en el estudio de la tecnología de barreras combinadas, orientando los esfuerzos científicos hacia el hallazgo de un equilibrio sinérgico que maximice la letalidad microbiana persistente sin inducir fitotoxicidad en hortalizas de hoja de alta susceptibilidad como la rúcula “baby”.

Por lo tanto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto combinado de la radiación UV-C y envases activos con antimicrobianos naturales (cital y carvacrol, aplicados de manera individual y en mezcla) en sistemas de atmósfera modificada pasiva sobre la composición gaseosa interna, la calidad microbiológica y la estabilidad de los compuestos funcionales (fenoles

totales, capacidad antioxidante y contenido de vitamina C) de hojas de rúcula “baby” almacenadas a 5 °C durante 9 días.

Materiales y métodos

Sitio experimental y material vegetal

El estudio se llevó a cabo en el Centro de Estudios Postcosecha (CEPOC) de la Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile (La Pintana, Región Metropolitana). Se utilizaron hojas de rúcula (*Eruca sativa* var. Vitale) “baby”, provistas por la Sociedad Agrícola Oasis de Lampa Ltda. (Lampa, Santiago de Chile). El cultivo se estableció mediante siembra directa en invernadero y la cosecha manual se efectuó a los 30 días posteriores a la siembra.

Reactivos y materiales de envasado

Se empleó citral y carvacrol de grado analítico ($\geq 99\%$) de pureza, Merck, Santiago, Chile). El envasado se realizó en bolsas de poliolefina multicapa de baja permeabilidad gaseosa (PD-961, Sealed Air–Cryovac, Santiago, Chile) de 22x25 cm, con una tasa de transmisión de $7000 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$. Los *sachets* activos se confeccionaron con papel filtro estéril Whatman N.º 6 (4x8 cm) impregnados con los compuestos, los cuales se insertaron dentro de bolsas de polipropileno de alta permeabilidad provistas de seis perforaciones de 0.5 cm de diámetro para permitir la volatilización.

Tratamientos y aplicación de UV-C

Las hojas de rúcula fueron seleccionadas, lavadas, desinfectadas con hipoclorito de sodio y enjuagadas con agua destilada, finalmente, se dispuso sobre mallas de acero inoxidable durante 5 min para su secado superficial. Luego se aplicó radiación UV-C en una cámara de emisión equipada con lámpara germicida sin filtro (TUV 36W/G36 T8, Philips, Países Bajos), a una dosis de $10 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2}$ durante un tiempo de exposición de 4 min (Hinojosa et al., 2013). Cada unidad experimental

consistió en una bolsa con 50 g de producto envasado bajo atmósfera modificada pasiva (MAP), durante 9 días 5 °C. Se evaluaron cinco tratamientos: 150Ci (*Sachet* con 150µL de citral), 75Ca: *Sachet* con 75 µL de carvacrol, 150Ci+75Ca (*Sachet* combinado con 150µL de citral y 75 µL de carvacrol), UV-C (Control expuesto únicamente a la radiación física) y BP (Testigo en bolsas plásticas perforadas).

Evaluación de la atmósfera modificada pasiva

La evolución interna de las concentraciones de O₂ y CO₂ (%) se determinó los días 1, 3, 6 y 9 de almacenamiento mediante un analizador manual de gases (Checkpoint, PBI Dansensor, Ringsted, Dinamarca). Para evitar la pérdida de vacío y la alteración de la atmósfera interna, el muestreo se realizó pinchando con la aguja del equipo a través de un septo de cinta adhesiva previamente adherido a la superficie externa de la bolsa.

Análisis microbiológico

El muestreo destructivo de las unidades experimentales se realizó los días 0, 3, 6 y 9 de conservación. De cada bolsa, se homogeneizaron 10 g de rúcula con 90 ml de agua peptonada tamponada estéril al 0.1% utilizando un digestor Stomacher (IUL Instruments, Barcelona, España) durante 1 min. Se realizaron diluciones seriadas y siembras en placas para la cuantificación de: bacterias aerobias mesófilas y psicotrofas (incubadas en PCA) y enterobacterias y *Escherichia coli* (incubadas en Agar EMB). Los recuentos se expresaron como el logaritmo de unidades formadoras de colonias por gramo (log UFC g⁻¹). Los umbrales de aceptación sanitaria se contrastaron con los límites máximos establecidos por la legislación chilena para vegetales preelaborados listos para el consumo (Reglamento Sanitario de los Alimentos, D.S. N.º 977/96).

Determinación del color

La determinación del color se realizó en 10 hojas de rúcula “baby” por tratamiento y repetición, evaluando la zona haz con un colorímetro triestímulo (Minolta CR-300, Japón) sobre fondo negro (Artés et al., 2006). Los parámetros de color se obtuvieron de forma automática para un luminante D65 y un ángulo observador de 0°. Los parámetros del espacio CIELab evaluados fueron luminosidad (L^*ab), croma métrica o saturación (C^*ab) y tono (H^*ab). También se calculó la variación de color global ($\Delta E00$) utilizando las ecuaciones propuestas por Sharma et al. (2005).

Compuestos funcionales

Fenoles totales. - El contenido fenólico se determinó mediante el método del reactivo de Folin-Ciocalteu modificado por Singleton et al. (1999), en muestras de rúcula “baby” congeladas a -80 °C, tomadas en los días 1, 3, 6 y 9 de conservación. Para la preparación del extracto se homogenizó 1 g de muestra con 10 mL de MeOH/H₂O (1:2, v/v) utilizando en Ultra-Turrax, se centrifugó (30 min, 4 °C) y el sobrenadante se filtró en papel (Whatman N.º 2). La solución se midió a 660 nm con un espectrofotómetro y se expresó como μg equivalentes de ácido gálico por gramo de peso fresco ($\mu\text{g EAG} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pf}$).

Actividad captadora de radicales libres 1,1-difenil-2-picrilhidrazilo (DPPH). - La actividad captadora de radicales de los extractos se evaluó mediante la modificación del método propuesto por Brand et al. (1995). Para la obtención de la muestra se pesaron 5 g de hojas de rúcula “baby” congeladas, se mezcló con 25 mL MeOH puro y se homogenizó 2 min a alta velocidad. El homogenizado se incubó por 12 h a 5°C y se centrifugó. El sobrenadante filtrado se midió por espectrofotometría. Se midió la absorbancia a 515 nm y los resultados se expresaron en μg equivalente de Trolox por g de peso fresco ($\mu\text{g T g}^{-1} \text{ pf}$).

Capacidad antioxidante de reducción férrica (FRAP). - La capacidad antioxidante se midió siguiendo la metodología de Benzie y Strain (2006), con ligeras modificaciones. la capacidad antioxidante de las hojas se evaluó como la capacidad para reducir Fe^{+3} a Fe^{+2} , el reactivo empleado fue el TPTZ (2,4,6-tripiridil-s-triazina). La actividad antioxidante se midió en un espectrofotómetro a 595 nm y las concentraciones se obtuvieron a partir de una curva estándar de Trolox. Los resultados se presentaron como equivalentes de Trolox ($\text{mg TE} \cdot \text{g}^{-1} \text{ pf}$). La determinación se realizó por triplicado para cada extracto.

Vitamina C. - Se cuantificó los días 1, 3 y 9 por HPLC (Cromatografía líquida de alta resolución) siguiendo la metodología propuesta por Zapata y Dufour (1992), con ligeras modificaciones. Se homogeneizaron 5 g de hojas con 8 mL de extractante (0,1 M ácido cítrico + 0,05% EDTA + 5% MeOH + 95% agua + 4mM NaF), se filtró y estandarizó el pH entre 2.2 y 2.4. Tras la derivatización con ortofenilendiamina (OPDA), las muestras se analizaron a una onda de 261 nm. La separación de ácido ascórbico se logró en una columna Kromasil 100-5C18 usando una fase móvil de metanol/agua (5:95 v/v) con cetrimida y tampón fosfato. La concentración se determinó mediante una curva estándar de L-ácido ascórbico, expresando los resultados en $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ de peso fresco.

Diseño experimental y análisis estadístico

Se empleó un diseño completamente al azar (DCA) con cinco tratamientos y tres repeticiones. La unidad experimental correspondió a una bolsa con 50 g de rúcula (*Eruca sativa*) “baby”. Los datos se analizaron mediante ANOVA con un nivel de significancia del 5%. En los casos con diferencias significativas, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey ($p < 0,05$), utilizando el software InfoStat versión 2008 (Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina).

Resultados

Atmósfera modificada pasiva (MAP)

Los cambios en la composición gaseosa en el espacio de cabeza de los envases activos de rúcula (*Eruca sativa*) “baby” reflejan la interacción entre la respiración de los tejidos vegetales y la permeabilidad selectiva del film a la difusión de gases. En este sentido, la Figura 1 muestra cómo durante el almacenamiento refrigerado a 5 °C, los tratamientos combinados (UV-C + antimicrobianos) experimentaron una marcada alteración metabólica, aumentando el CO₂ de hasta 8 %, acompañada de una drástica reducción del O₂ a niveles del 1 %. En contraste, el testigo BP mantuvo una atmósfera de CO₂ entre 1,0 y 1,7 % y de O₂ alrededor de 19,4 %, lo que corrobora la ausencia de estímulos inductores de respiración y un contacto con la atmósfera externa.

Resultados Análisis microbiológico

Aerobios Mesófilos: La carga inicial de bacterias aerobias mesófilas (Figura 1A) experimentó un incremento progresivo hasta el día 6 y un posterior descenso en los recuentos hacia el día 9 de almacenamiento. Todas las muestras expuestas a la radiación UV-C y a los envases activos con antimicrobianos exhibieron recuentos significativamente menores en comparación con el control BP. Destacó el tratamiento combinado 150Ci+75Ca (UV-C + mezcla de antimicrobianos), el cual logró la máxima reducción significativa de 1.6 unidades logarítmicas (log UFC/g) respecto al testigo BP. Esta tendencia inhibitoria se extendió hasta el día 6, registrando reducciones de 1.2 y 0.5 log UFC/g en comparación con los controles BP y UV-C, respectivamente.

Enterobacterias: Los tratamientos que incorporaron antimicrobianos naturales indujeron una disminución drástica en la población inicial de enterobacterias. Desde el primer día de evaluación (Figura 1B), el tratamiento mixto (150Ci+75Ca) demostró la mayor eficacia al alcanzar reducciones significativas de 2.5 log UFC/g respecto al control UV-C y de 3.4 log UFC/g frente al

control BP. Este efecto protector se prolongó hasta el día 9 de almacenamiento, donde se mantuvieron reducciones significativas superiores a los 2 ciclos logarítmicos en comparación con el testigo BP.

Escherichia coli: Inicialmente, el tratamiento combinado 150Ci+75Ca generó un descenso inicial significativo de 3.4 log UFC/g en comparación con el control BP. Esta marcada tendencia bacteriostática y bactericida se sostuvo de forma consistente durante los días 3 y 6 de almacenamiento. Sin embargo, al finalizar el periodo de conservación (día 9), no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre los controles y los envases activos con antimicrobianos naturales. En esta última fase, todos los tratamientos excedieron los umbrales máximos tolerados por el Reglamento Sanitario de los Alimentos de Chile (D.S. N.º 977/2012).

Psicrótrofos: La carga de microorganismos psicrótrofos (Figura 1D) presentó una tendencia similar a la de las bacterias aerobias mesófilas, registrando al llegar al día 9 una transición desde la fase estacionaria hacia la fase de declive celular. Pese a ello, tanto el control UV-C como los tratamientos combinados mantuvieron niveles poblacionales inferiores a lo largo de todo el ensayo. Durante los días 1 y 3 de evaluación, el empaque individual 150Ci mostró una mayor efectividad respecto a los controles. No obstante, hacia los días 6 y 9, el tratamiento mixto 150Ci+75Ca demostró un desempeño superior, alcanzando reducciones de hasta 2.2 unidades logarítmicas en comparación con el testigo BP.

Compuestos funcionales

Al evaluar el contenido de fenoles totales ($\mu\text{g EAG g}^{-1} \text{ pf}$), se observó que el testigo BP, el UV-C y los tratamientos 150Ci y 75Ca, se mantuvieron estables sin variaciones respecto al día 1, se registraron valores entre 91,1 y 106,2 $\mu\text{g EAG g}^{-1} \text{ pf}$ (Apéndice); mientras que el tratamiento combinado 150Ci+75Ca experimentó un repunte inmediato y significativo, alcanzando 127.4 $\mu\text{g/g}$.

Al día 6, todos los tratamientos alcanzan su nivel máximo de fenoles. Finalmente, al día 9 el testigo BP y el tratamiento 150Ci sufren un significativo descenso, con respecto al tratamiento combinado 150Ci+75Ca que presentó el valor de 135,5 4 μg EAG g⁻¹ pf.

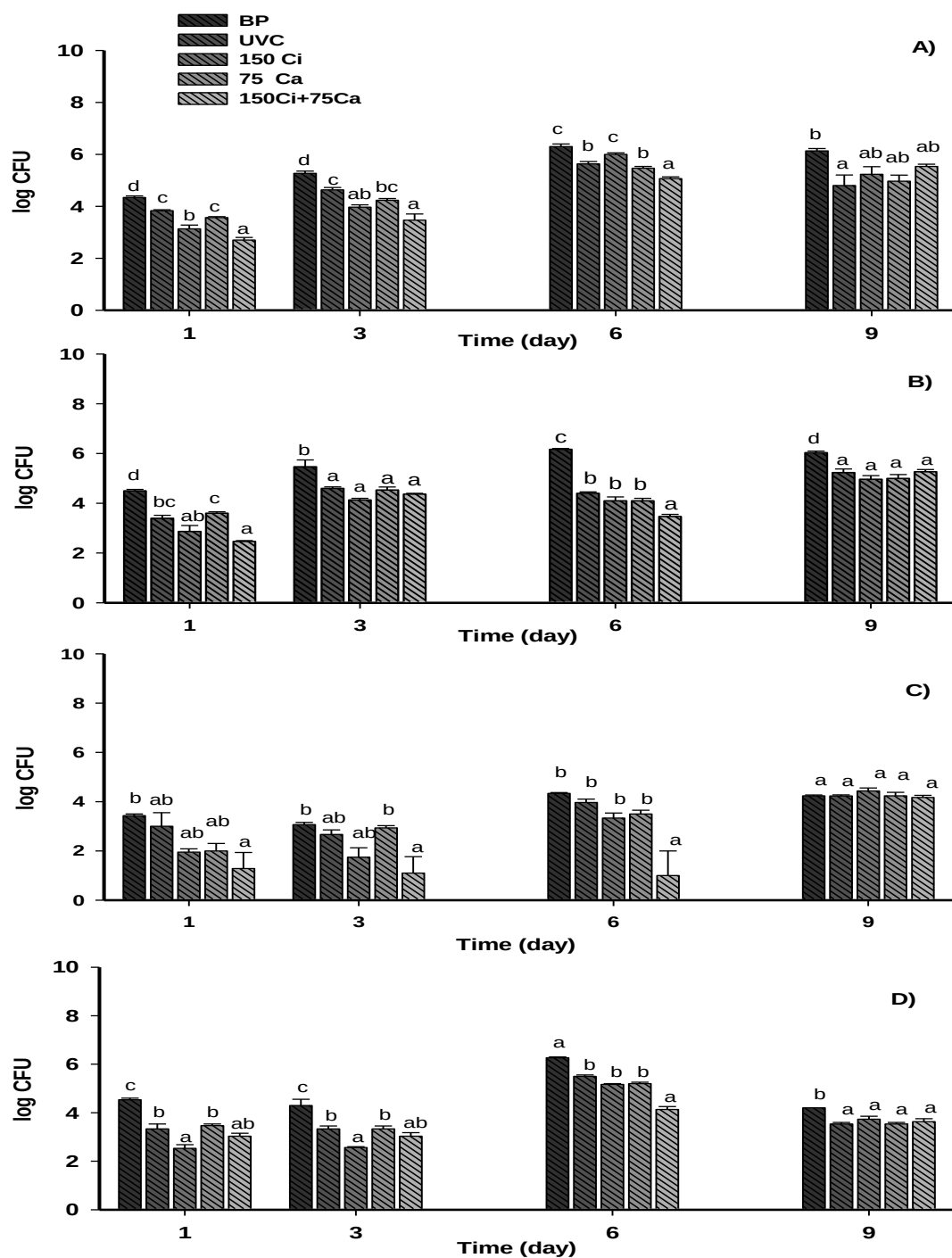


Figura 2. Recuento de aerobios mesófilos (A), enterobacterias (B), *E. coli* (C) y psicrótrofos (D) en hojas de rúcula “baby” conservadas en envases activos con antimicrobianos naturales y UVC.

En cuanto a la capacidad antioxidante por el Método DPPH. Todos los tratamientos experimentan una disminución significativa desde el día 1 hasta el día 9, terminan con el mismo nivel aparente de actividad. En cuanto a la capacidad antioxidante por el Método FRAP, se debe indicar que FRAP no mide el apagado de un radical libre (como DPPH), sino la capacidad de transferir electrones para reducir el hierro (Fe^{3+} a Fe^{2+}). Por lo tanto, el testigo BP disminuyó significativamente y pasó de 2.4 (día 0) a 1.7 mg Trolox/g (día 9), mientras que el tratamiento combinado 150Ci+75Ca es el único que mantuvo estable la capacidad reductora férrica, presentando niveles de 2.7, 2.3, 2.1 y 2.2 mg Trolox/g.

La evolución del contenido de vitamina C reveló un comportamiento atípico pero consistente con los sistemas de defensa vegetal, posiblemente activados por estrés ambiental. No se observó la degradación oxidativa común de tejidos foliares senescentes, los niveles de ácido ascórbico se mantuvieron estables para luego incrementar hacia el día 9 de almacenamiento, principalmente los tratamientos con UV-C y de forma significativa los tratamientos individuales 150Ci y 75Ca.

Discusión

Atmósfera modificada pasiva (MAP)

En preensayos iniciales se definió una carga de 50 g por bolsa (22×25 cm), sin considerar la aplicación de UV-C. No obstante, la incorporación de UV-C como pretratamiento provocó un marcado estrés fisiológico en el tejido foliar, manifestándose en una aceleración de la tasa de respiración y una consecuente disminución del O_2 (hasta 1%). Estudios similares de interacción directa entre la dosis de radiación UV-C y la tasa de transmisión de gases, demostraron matemáticamente que un tratamiento físico externo (como el UV-C) rompe el equilibrio de un sistema MAP estándar si no se recalculan las dimensiones y la tasa de permeabilidad del envase (Gimeno et al. 2022). En consecuencia, el tamaño de bolsa determinado en los preensayos no fue

suficiente para amortiguar los efectos gasométricos derivados de la irradiación, confirmando que las tecnologías físicas de descontaminación por radiación ultravioleta exigen

Una aceleración de la tasa de respiración, coincide con lo reportado de forma reciente en vegetales de hoja, donde la radiación de onda corta (UV-C) altera el metabolismo energético y acelera inicialmente las dinámicas de respiración tras romper la homeostasis celular (Kibar, 2025).

La respuesta fisiológica de disminución de O₂ y aumento de CO₂, es típico de sistemas de atmósfera modificada pasiva (MAP), y guarda estrecha concordancia con los hallazgos históricos determinados por Fonseca (2002). Sin embargo, el fuerte descenso de O₂ hasta 1%, puede estar relacionado al comportamiento característico de las hojas de rúcula expuestas a radiación ultravioleta (Gutiérrez, 2015). También, se debe considerar que los niveles bajos de O₂ retrasan la degradación de la clorofila y el amarillamiento, pero alcanzar el 1% de O₂ puede situar al tejido foliar en el límite estricto de la tolerancia anaeróbica (Torales, 2020).

Por otro lado, la diferencia de comportamiento entre tratamientos sugiere que la inclusión de carvacrol y citral en el espacio de cabeza del envase, podrían alterar la fisiología del tejido vegetal. Werrie (2020) ha documentado que la exposición a vapores de aceites esenciales a concentraciones con actividad antimicrobiana provoca alteraciones mitocondriales temporales en tejidos vegetales de alta tasa metabólica, provocando una hiper-respiración. Por consiguiente, los resultados reportados ponen de manifiesto la compleja naturaleza sistémica del envasado activo, donde coexisten e interactúan la dosis del tratamiento físico, la tasa de transmisión del film, el volumen útil del contenedor y la volatilidad de los AE.

Discusión Análisis microbiológico

El perfil cinético caracterizado por un incremento poblacional seguido de un descenso en el transcurso del tiempo refleja el crecimiento, la adaptación natural de la microbiota nativa del

vegetal y su consecuente transición hacia la fase de muerte celular (Jacxsens et al., 2002). Esta etapa de declive es impulsada de forma sinérgica por el agotamiento de sustratos nutritivos en la superficie de la hoja y la acumulación de desechos metabólicos fitotóxicos, coincidiendo con el establecimiento de una atmósfera interna estresante 8% de CO₂ al final del almacenamiento (Allende y Artés, 2003).

Los resultados obtenidos demuestran que los antimicrobianos naturales constituyen una alternativa viable para la conservación en envases activos, debido a su capacidad para volatilizarse en el espacio de cabeza del empaque e inhibir el desarrollo microbiano sobre matrices alimentarias. Investigaciones en envases activos refuerzan esta estrategia; por ejemplo, Mahecha (2024) extendió la vida útil de fresas de 15 a 21 días empleando recubrimientos activos con cinamaldehído, eugenol y mentol, destacando el desempeño del mentol, mientras que el eugenol evidenció una menor eficiencia relativa. Asimismo, Rusková et al. (2023) manifestaron que la adición de aceites esenciales al envasado activo optimiza su acción antimicrobiana en fresas frescas, observando que las almohadillas con aceite de limoncillo (cital) fueron más efectivas para inhibir mohos durante todo el almacenamiento, y que el aceite de orégano (carvacrol) generó disminuciones microbiológicas en aerobios mesófilos que no difirieron estadísticamente del limoncillo. Estos antecedentes ratifican el fundamento científico de emplear la combinación de antimicrobianos propuesta en este estudio.

Por otra parte, se infiere que la luz UV-C opera como un agente físico de desinfección superficial eficaz debido a que induce daños fotoquímicos directos en el ADN microbiano. Estos resultados concuerdan con las investigaciones pioneras de Allende y Artés (2003), donde la combinación de radiación UV-C y sistemas MAP potencia el control microbiológico al bloquear la replicación celular y provocar un freno bacteriostático (Cortés et al., 2023). En esta misma línea,

Liao et al. (2024) evaluaron la combinación de aceite esencial de pomelo con radiación UV-C (100 mJ/cm²) como estrategia de conservación en tomates cherry, lechuga y arándanos frescos, logrando reducciones de entre 1.92 y 3.96 log UFC/g para *Escherichia coli* O157:H7 durante 7 días de almacenamiento a 4 °C. Esta analogía en los indicadores ratifica el alto potencial de tecnologías combinadas para el control de microorganismos de IV gama.

No obstante, la pérdida de efectividad observada al final del almacenamiento para *E. coli*, puede deberse a factores adaptativos específicos. Aunque el tratamiento con UV-C es efectivo de forma inmediata, los microorganismos supervivientes pueden reparar las estructuras del ADN y volver a multiplicarse mediante mecanismos de reparación por escisión de nucleótidos (NER) activados tras la irradiación (Maioto et al., 2026). A este factor se suma la ventaja metabólica intrínseca de las enterobacterias: *E. coli* es un microorganismo anaerobio facultativo, por lo que el microambiente ácido generado por el 8% de CO₂ activó rutas de respiración anaerobia que promovieron su reactivación celular y multiplicación hacia el cierre de la vida útil (Partridge et al., 2007). Finalmente, la pérdida gradual por volatilización o sorción del carvacrol y citral dentro de la bolsa plástica polimérica pudo haber disminuido la presión química (Velázquez, 2022), reduciendo a concentraciones mínimas inhibitoria y facilitando la multiplicación del patógeno a los 9 días de almacenamiento.

Discusión compuestos funcionales

Estudios sugieren que el tratamiento con UV-C actuó como un estímulo ambiental que activa la ruta metabólica de los fenilpropanoides mediante la inducción de la enzima fenilalanina amonio-liasa (PAL), clave para la síntesis de fenoles y ligninas como mecanismo de defensa (Rivera et al., 2007), mientras que sin tratamientos prevaleció la degradación en etapas avanzadas. De manera similar, Romero et al. (2022) reportaron que la combinación de películas plásticas

durante la producción y tratamientos UV-B postcosecha incrementó significativamente los fenoles totales, ácido ascórbico y actividad antioxidante en rúcula silvestre. Asimismo, Menga et al. (2025) y Martínez et al. (2021) evidenciaron efectos positivos de la irradiación UV-C sobre la vida útil, propiedades fisicoquímicas, sensoriales y nutricionales en matrices alimentarias como brócoli, rábano y espárragos. No obstante, se requiere ampliar la investigación, ya que estudios comparativos entre UVA, UVB y UVC en espinaca fresca cortada demostraron que UVB presentó mayor eficacia para prolongar la vida útil y conservar la calidad nutricional (Kibar y Kibar, 2025).

Adicionalmente, la naturaleza fenólica del carvacrol exógeno puede favorecer su migración y absorción desde el espacio de cabeza del envase activo hacia la matriz vegetal, incrementando los valores determinados mediante el ensayo Folin-Ciocalteu (Ramos et al., 2013), lo que podría explicar el aumento de fenoles observado en el tratamiento combinado 150Ci+75Ca.

Conclusiones

La combinación de radiación UV-C ($10 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$) y envases activos con antimicrobianos naturales (cital y carvacrol) demostró un efecto sinérgico y positivo para la conservación de rúcula (*Eruca sativa*) “baby” mínimamente procesada durante el almacenamiento refrigerado a 5°C , derivando en las siguientes conclusiones clave:

La incorporación del pretratamiento con UV-C y los antimicrobianos volátiles aceleró significativamente el consumo de O_2 y la acumulación de CO_2 debido al estímulo metabólico inicial del tejido foliar. Este comportamiento pone de manifiesto que la inclusión de tecnologías físicas de descontaminación exige un rediseño de las propiedades de barrera del film o un incremento del espacio de cabeza (*headspace*) en sistemas de atmósfera modificada pasiva (MAP), previniendo anoxias críticas severas que puedan enmascarar o condicionar la verdadera eficacia antimicrobiana del sistema.

La aplicación combinada de luz UV-C con la mezcla de citral y carvacrol resultó ser el tratamiento más efectivo para el control bacteriano óptimo de hasta 6 días, manteniendo los recuentos de bacterias aerobias mesófilas, psicrótrofas y enterobacterias en sus niveles mínimos vigentes. Asimismo, las bacterias psicrótrofas nativa experimentó un perfil cinético bifásico con una fase terminal de declive (día 9), confirmando el efecto letal continuo ejercido por el confinamiento gaseoso y el microambiente estresante del envase sobre las poblaciones aerobias.

Hacia el cierre de la vida útil (día 9), se evidenció un escape microbiológico y proliferación tardía de *Escherichia coli*. Este fenómeno se atribuye de forma conjunta a la versatilidad metabólica anaerobia facultativa del patógeno y al agotamiento cinético de los volátiles activos por fenómenos de volatilización y sorción polimérica, lo que subraya la necesidad tecnológica de desarrollar perfiles de liberación controlada y sostenida en el tiempo para mitigar el repunte de bacterias *Escherichia*.

El tratamiento combinado (150Ci+75Ca) actuó como un eficiente escudo protector y un inductor del metabolismo secundario del vegetal. La tecnología estimuló de forma consecutiva un incremento significativo y la retención prolongada del contenido de fenoles totales a partir del día 3, preservando de manera homóloga la estabilidad de la capacidad antioxidante real medida por el poder reductor férrico (FRAP) y salvaguardando la integridad molecular de la vitamina C frente a la degradación por senescencia observada en el lote testigo desprotegido.

En conjunto, estos resultados demuestran de forma sencilla que la tecnología combinada no solo conservó la rúcula, sino que potenció de forma consecutiva sus principales compuestos benéficos para la salud.

Referencias bibliográficas

- Allende, A. & F. Artés. (2003). Combined ultraviolet-C and modified atmosphere packaging treatments for reducing microbial growth of fresh processed lettuce. *Food Science and Technology* 36(8): 779-786.
- Artés, F. (2006). El envasado en atmósfera modificada mejora la calidad de consumo de los productos hortofrutícolas intactos y mínimamente procesados en fresco. *Tecnología Iberoamericana de Postcosecha* 7(2): 61-85.
- Benites, J., Gutiérrez, D., Ruiz, S. & Rodríguez, S. (2026). Effect of UV-C Radiation and Modified Atmosphere Packaging on Minimally Processed Grated Pumpkin Squash. *Biology and Life Sciences Forum*, 56 (1). Disponible en línea: <https://doi.org/10.3390/blsf2026056002>.
- Benzie I. & Strain, J. (2006). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: the FRAP assay. *Analytical Biochemistry* 239(1): 70-76.
- Benzie, I., Strain, J. (1996) La capacidad reductora férrica del plasma (FRAP) como medida del poder antioxidante: El ensayo FRAP. *Anal. Biochem*, 239, 70–76.
- Brand, W., Cuvelier, M. & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT. Food Science and Technology* 28(1): 25-30.
- Cortés, L., Moncayo, D., & Castellanos, D. (2023). Development of an antimicrobial packaging system for fresh cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) fruits. *Food Packaging and Shelf Life*, 38, 101113. Dio:<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101113>.
- Escalona, V., Luchsinger, L. & Lizana, A. (2008). Efecto del envasado en atmósfera modificada sobre la calidad y la conservación de frutas y hortalizas. *Revista Aconex* 98: 16-24.
- Fahey, J., A. Zalcmann and P. Talalay. 2001. The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants. *Journal of Food Science* 56(1): 5-51.
- Fonseca, S., Oliveira, F., & Brecht, J. (2002). Modelado de la tasa de respiración de frutas y verduras frescas para envases con atmósfera modificada: una revisión. *Journal of Food Engineering*, 52:99–119. Doi: 10.1016/S0260-8774(01)00106-6.
- Gimeno, D., González, J., Oria, R., Venturini, M., & Arias, E. (2022). Effect of Modified Atmosphere Packaging (MAP) and UV-C Irradiation on Postharvest Quality of Red Raspberries. *Agriculture*, 12(1), 29. Dio: <https://doi.org/10.3390/agriculture12010029>.
- Gutiérrez, D., Char, C., Escalona, V., Chaves, A., & Rodríguez, S. (2015). Application of UV-C Radiation in the Conservation of Minimally Processed Rocket (*Eruca sativa* Mill.). *Journal of Food Processing and Preservation*, 39, 1426–1433. Dio: <https://doi.org/10.1111/jfpp.12577>.

- Gutiérrez, J., Bourke, P., Lonchamp, J., & Barry, C. (2009). Impact of plant essential oils on microbiological, organoleptic and quality markers of minimally processed vegetables. *Food Science and Emerging Technologies* 10(2): 195-202.
- Gutiérrez, M., & Ponce, N. (2019). Effect of clove essential oil on the preservation of fresh-cut apple. *Journal of Food Quality*, 2019, 1–9.
- Hinojosa, A., Silveira, S., Ospina, M., Char, C., Saenz, C. & Escalona, V. (2013). Safety of ready-to-eat watercress using environmentally friendly sanitization methods. *Journal of Food Quality* 36(1): 66-76.
- Jacxsens, J., Devlieghere, F. & Debevere, J. (2002). Predictive modelling for packaging design: equilibrium modified atmosphere packages of fresh-cut vegetables subjected to a simulated distribution chain. *International Journal of Food Microbiology*, 73: 331 – 341.
- Kibar, H. & Kibar, B. (2025). Comparison of Ultraviolet A, B and C Treatments in Preserving the Quality of Fresh-Cut Spinach. *National Library of Medicine*, 14(8):1374.
- Kibar, H., & Kibar, B. (2025). Comparison of ultraviolet A, B and C treatments in preserving the quality and nutritional integrity of fresh-cut spinach. *Foods*, 14(8), 1374. Dio:<https://doi.org/10.3390/foods14081374>.
- Li, Y., Mei, J., & Xie, J. (2025). Citral: Bioactivity, metabolism, delivery systems, and food preservation applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 24(3), e70168. Dio:<https://doi.org/10.1111/1541-4337.70168>.
- Liao, N., Chen, X., Tang, M., Tian, P., Liu, C., Ruan, L., Pan, H., Shu, M., Zhong, C., & Wu, G. (2024). Grapefruit essential oil combined with UV-C treatment: A technology to improve the microbial safety of fresh produce. *Innovative Food Science & Emerging Technologies Elsevier*, 93: 103639. Dio:<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2024.103639>.
- Mahecha, Y. (2024). Configuración de un sistema de empaque activo con inclusión de un absorbente de humedad y un agente antimicrobiano para la preservación de la vida útil de fresa (*Fragaria ananassa*). Biblioteca Digital UNAL (Universidad Nacional de Colombia).
- Maioto, R., Santos, S., Dias, A., Azeiro, C., Inês, A., Bendrime, N., Mendes, P., Rodrigues, P., & Sampaio, A. (2026). Radiação UV: Aplicações em superfícies na indústria alimentar. *Applied Sciences*, 16(4), 1877. Dio:<https://doi.org/10.3390/app16041877>.
- Martínez, L., Catillo, N., Gómez, P., Pedreño, J. & Artés, F. (2021). Efecto de la radiación postcosecha UVB y UV-C en la calidad bioactiva de germinados de brócoli y rábano. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, vol. 22, núm. 2, 202. Dio:<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81369610010>.
- Menga, V., Beleggia, R., Pio, D., Russo, M. & Fares, C. (2025). The Post-Harvest Application of UV-C Rays: Effects on the Shelf Life and Antioxidants of Fresh Green Asparagus

- (*Asparagus officinalis* L.). *Applied Sciences*, 15(15), 8533. Dio:<https://doi.org/10.3390/app15158533>.
- Partridge, J., Sanguinetti, G., Dibden, D., Roberts, R., Poole, R., & Green, J. (2007). Transition of *Escherichia coli* from Aerobic to Micro-aerobic Conditions. *Journal of Biological Chemistry*, 283:15. Dio:<https://doi.org/10.1074/jbc.M700728200>.
- Ramos, M., Beltrán, A., Valdés, A., Peltzer, M., Jiménez, A., Garrigós, M. C., & Zaikov, G. E. (2013). Carvacrol and thymol for fresh food packaging. *Journal of Bioequivalence & Bioavailability*, 5(4), 154–160. <https://doi.org/10.4172/jbb.1000151>.
- Rivera, D., Gardea, A., Martínez, M., Rivera, M. & González, G. (2007). Efectos bioquímicos postcosecha de la irradiación UV-C en frutas y hortalizas. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 30(4): 361-372.
- Romano, R., Pizzolongo, F., De Luca, L., Cazzolino, E., Rippa, M., Ottaviano, L., Mormile, P., Mori, M., & Della Mola, I. (2022). Bioactive Compounds and Antioxidant Properties of Wild Rocket. *Foods*, 11(24), 4093. Dio:<https://doi.org/10.3390/foods11244093>.
- Rusková, M., Opálková, A., Moňáková, K., Gago, C., Guerreiro, A., Bučková, M., Puškárová, A., Pankov, D., & Antunes, M. (2023). Biodegradable Active Packaging Enriched with Essential Oils for Enhancing the Shelf Life of Strawberries. *Antioxidant Activity of Essential Oils*, 12(3), 755. Dio:<https://doi.org/10.3390/antiox12030755>.
- Sharma, G., Wu, W., & Dalal, E. (2005). The CIEDE2000 Color-Difference, Formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. 30: 21-30.
- Singh, S., Chaurasia, P., & Bharati, S. (2022). Functional roles of essential oils as an effective alternative of synthetic food preservatives: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(11), e16804. Dio:<https://doi.org/10.1111/jfpp.16804>.
- Singleton, V., Orthofer, R. & Lamuela, R. (1999). Análisis de fenoles totales y otros sustratos de oxidación y antioxidantes mediante el reactivo de Folin-Ciocalteu. *Methods Enzymol*, 299, 152–178.
- Torales, A., Gutiérrez, D. & Rodríguez, S. (2020). Influence of passive and active modified atmosphere packaging on yellowing and chlorophyll degrading enzymes activity in fresh-cut rocket leaves. *Food Packaging and Shelf Life* 26(3):100569. Dio: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100569>
- Velázquez, F. (2022). Envases activos con β -ciclodextrinas para liberación de agentes antimicrobianos naturales en alimentos de IV gama. Universidad Católica de Murcia. España.

- Serie, P., Durenne, B., Delaplace, P., & Fauconnier, M. (2020). Phytotoxicity of essential oils: Opportunities and constraints for the development of biopesticides. A review. *Foods*, 9(9), 1291. Dio:<https://doi.org/10.3390/foods9091291>.
- Zapata, S. & J. Dufour. (1992). Ascorbic, dehydroascorbic and isoascorbic acid simultaneous determinations by reverse phase Ion interaction HPLC. *Jornal of Food Science* 57(2): 506-511.