

# OPTIMIZACIÓN DE UNA FORMULACIÓN DE ANTIOXIDANTES, CON LA TÉCNICA DE IMPREGNACIÓN AL VACÍO, PARA MEJORAR EL COLOR DE LOS PALMITOS DE IRACA



## OPTIMIZATION OF AN ANTIOXIDANT FORMULATION, USING THE TECHNIQUE OF VACUUM IMPREGNATION, TO IMPROVE THE COLOR ON HEARTS OF IRACA PALM

Ossa Cardona, Cristian Camilo; Cortés Rodríguez, Misael; Hoyos Sánchez, Rodrigo Alberto

Cristian Camilo Ossa Cardona

ccossac@unal.edu.co

Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias. Medellín, Colombia., Colombia

 Misael Cortés Rodríguez

mcortesro@unal.edu.co

Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias. Medellín, Colombia., Colombia

 Rodrigo Alberto Hoyos Sánchez

rhoyos@unal.edu.co

Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias. Medellín, Colombia., Colombia

### Revista de Investigación Agraria y Ambiental

Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia

ISSN: 2145-6097

ISSN-e: 2145-6453

Periodicidad: Semestral

vol. 14, núm. 1, 2023

riaa@unad.edu.co

Recepción: 02 Agosto 2022

Aprobación: 02 Septiembre 2022

Publicación: 17 Diciembre 2022

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/130/1303815005/>

DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.6014>

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/about>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

CÓMO CITAR: Ossa, C., Cortés, M. y Hoyos, R. (2023).

Optimización de una formulación de antioxidantes, con la técnica

**Resumen: Contextualización:** La ingeniería de matrices utiliza la técnica de impregnación al vacío [IV] con el objetivo de conferir valor agregado a estructuras alimentarias porosas.

**Vacío de conocimiento:** ¿es efectiva la aplicación de soluciones antioxidantes, usando el proceso de impregnación al vacío, para controlar el pardeamiento de los cogollos frescos de palma de Iraca?

**Propósito:** El objetivo de la investigación fue optimizar [experimentalmente] una formulación de antioxidantes, con la técnica de IV, para mejorar el color de unos palmitos de Iraca [PI] con diámetros entre 10 - 12 mm y longitud de 4 cm.

**Metodología:** Para evaluar la formulación se utilizó la metodología de superficie de respuesta, con un diseño central compuesto [ $\alpha = 1$ ], considerando las siguientes variables independientes [VI]: ácido cítrico [AC] [100–300 mg por cada 100 g de PI], ácido ascórbico [AA] [12 – 24 mg/100 g PI], bisulfito de sodio [BS] [500–1500 ppm]. Las variables dependientes que se tomaron en cuenta fueron [VD]: fracción volumétrica de impregnación y deformación volumétrica en la etapa de vacío [ $X_1$  y  $g_1$  respectivamente], fracción y deformación volumétrica final [ $X$  y  $g$ ], porosidad efectiva de IV [ $E_e$ ] y cambios de color en la zona radial y longitudinal [ $\Delta E_{Longitudinal}$  y  $\Delta E_{Radial}$  respectivamente] a los 3 días de almacenamiento bajo refrigeración. Adicionalmente, la formulación contenía NaCl [0,6 %] y ácido etilendiaminotetraacético [75 mg por cada 1 000 g de PI]. Por otra parte, las condiciones del proceso IV fueron las siguientes: PI con diámetros entre 10 a 12 mm y 4 cm de longitud, presión de vacío [4,1 kPa], presión barométrica local [85,3 kPa], tiempo en la etapa de vacío [4,47 min] y tiempo según la presión barométrica local [3,97 min].

**Resultados y conclusiones:** La formulación de la solución de impregnación, utilizada para la optimización, se determinó así: AC = 165,8 mg por cada 100 g de PI, AA = 16,5 mg por cada 100 g de PI y BS = 1 500 ppm. Los parámetros de IV fueron:  $X_1 = 17,1 \%$ ,  $g_1 = 0,131 \%$ ,  $X = 20,0 \%$ ,  $g = -0,645 \%$  y  $E_e = 23,6 \%$ , y el

de impregnación al vacío, para mejorar el color de los palmitos de Iraca. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(1), 103 - 122. <https://doi.org/10.22490/21456453.6014>

efecto de la solución de impregnación permitió  $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$  de 4,9 y  $\Delta E_{\text{Radial}}$  de 9,1. PI contiene una matriz alimentaria adecuada para el proceso de IV con soluciones antioxidantes, lo que permite el control del pardeamiento enzimático en su estructura. Adicionalmente, la técnica de IV utilizada confiere alternativas para la incorporación de compuestos activos a PI; como mejoradores de sabor y de textura, entre otros, lo que contribuirá a generar un mayor valor en la agrocadena.

**Palabras clave:** Ácido ascórbico, ácido cítrico, bisulfito de sodio, alimentos mínimamente procesados, *carludovica palmata*, ingeniería de matrices, pardeamiento enzimático.

**Abstract: Contextualization:** Matrix Engineering uses the vacuum impregnation technique [IV] to confer added value to porous food structures.

**Knowledge gap:** Is the application of antioxidant solutions effective, using the vacuum impregnation process, to control the browning on fresh hearts of Iraca palm?

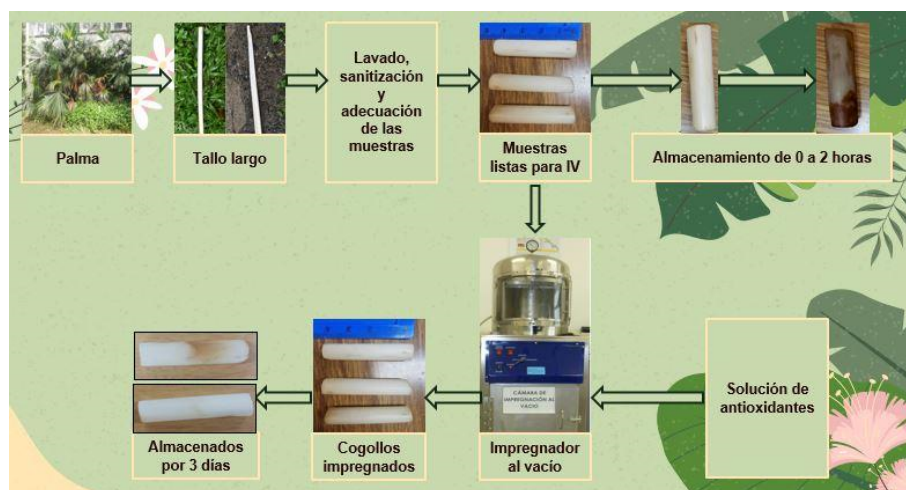
**Purpose:** The object of the investigation was to [experimentally] optimize a formulation of antioxidants, with the technique of IV, to improve the color of hearts of Iraca palm (PI) with diameters between 10 – 12 mm and length of 4 cm.

**Methodology:** To evaluate the formulation was used a response surface methodology, with a central compound design, [ $\alpha=1$ ], considering these independent variables [VI: citric acid [CA] [100–300 mg for each 100 g of PI], ascorbic acid [AA] [12–24 mg for each 100 g of PI], sodium bisulfite [SB] [500–1500 ppm]. The dependent variables valued were [VD]: volumetric fraction of impregnation and volumetric deformation in the vacuum stage [ $X_1$  and  $g_1$  respectively], fraction and final volumetric strain [ $X$  and  $g$ ], effective porosity of IV [ $E_e$ ], and color changes in the longitudinal and radial zones [ $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$  y  $\Delta E_{\text{Radial}}$  respectively] after 3 days of storage under refrigeration. In addition, the formulation contained NaCl [0,6 %] and ethylenediaminetetraacetic acid [75 mg for each 1 000 g PI]. Besides, the IV process was effected under these conditions: PI with diameters between 10 and 12 mm and 4 cm length, vacuum pressure [4,1 kPa], atmospheric pressure [85,3 kPa], time in vacuum [4,5 minutes] and time according to the atmospheric pressure [4,0 minutes].

**Results and conclusions:** The formulation of the impregnation suspension, used for the optimization, was determined as follows: CA = 165,8 mg for each 100 g of PI, AA = 16,5 mg for each 100 g of PI, and SB = 1500 ppm; The IV parameters were:  $X_1 = 17,1\%$ ,  $g_1 = 0,131\%$ ,  $X = 20,0\%$ ,  $g = -0,645\%$  y  $E_e = 23,6\%$ , and the effect of the impregnation solution allowed the following values:  $\Delta E_{\text{Longitudinal}} = 4,9$  y  $\Delta E_{\text{Radial}} = 9,1$ . PI contains a food matrix suitable for the IV process with antioxidant solutions, allowing the control of the enzymatic browning in its structure. Additionally, the VI technique used provides alternatives for the incorporation of active compounds to PI; as flavor and texture improvers, among others, that will contribute to generate a greater value in the food production system.

**Keywords:** Ascorbic acid, *carludovica palmata*, citric acid, minimally processed foods, sodium bisulfite, matrix engineering, enzymatic browning.

## RESUMEN GRÁFICO



autores.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los PI son vegetales comestibles que se obtienen a partir de los cogollos frescos de la palma, presentes en los tallos en proceso de maduración, y se extraen del tejido meristemático [de la base del pecíolo] en los brotes foliares sin abrir (Fernández y Mendoza, 2018). Además, son una fuente de alimentación de baja ingesta calórica [ $\cong 25$  kcal por cada 100 g], con un contenido de carbohidratos del 4,30 % y de grasa del 0,02 %, lo que le confiere un potencial desarrollo industrial enfocado en nichos de alimentos dietarios (Viola et al., 2020).

Los PI son de tonalidad blanca; sin embargo, en contacto con el aire presentan pardeamiento enzimático, tornándose a un color marrón indeseable, principalmente cuando existen daños físicos. Para solucionar esto, la industria alimentaria utiliza sustancias antioxidantes que previenen el pardeamiento de los alimentos. Adicionalmente, algunas de estas sustancias desempeñan un papel protector en el cuerpo, al neutralizar los radicales libres, reparar las membranas oxidadas y reducir la producción de oxígeno reactivo (Das et al., 2021). Entre las sustancias antioxidantes utilizadas se destacan: el ácido ascórbico [AA], como secuestrante de varias formas de  $O_2$  (Salas-Pérez et al., 2018); el ácido cítrico [AC], que inhibe la acción de la polifenol oxidasa [PPO] al reducir el pH y quelar el cobre del sitio activo de la enzima (Bata et al., 2021); el ácido etilendiaminotetraacético [EDTA], el cual actúa como agente quelante de metales y reduce principalmente el  $Fe^{2+}$  para impedir su actividad (Celus et al., 2020). Además, el bisulfito de sodio [BS] se usa como conservante esencial en diversos alimentos, actuando como agente blanqueador (Feng et al., 2021), prolongando la vida útil de los alimentos y previniendo el crecimiento de bacterias, mohos y levaduras (Jeong et al., 2020).

Aparte de la agregación de antioxidantes, las operaciones de adición de componentes fisiológicamente activos, como vitaminas, minerales y otros, se ha convertido en una práctica comercial para la industria alimentaria. Esta adición de componentes activos a los comestibles se denomina enriquecimiento de alimentos, y supone la suplementación de nutrientes en niveles superiores a los encontrados de forma natural en los alimentos.

Para lograr exitosamente dicha práctica, la industria ha desarrollado diferentes tecnologías, entre las cuales podemos encontrar el proceso de impregnación al vacío [IV], que aprovecha los poros existentes en los tejidos biológicos para la incorporación de una solución externa, la cual puede contener componentes activos, depresores de la actividad acuosa [aw], mejoradores de sabor y textura, componentes para el control del pardeamiento, entre otros (Shiekh et al., 2021). El proceso implica una primera etapa de vacío, que resulta en la remoción de gases de los poros; luego, se restablece la presión atmosférica donde el líquido de impregnación [LI] llena los poros mientras el tejido se relaja hasta un nuevo equilibrio (Derossi et al., 2021).

La modelización del proceso de IV fue descrita por Salvatori et al. (1998), señalando que tal proceso permite mejorar las propiedades nutricionales, sensoriales, físicas, fisicoquímicas o funcionales de los alimentos, y así conseguir que estos tengan mayor valor agregado y vida útil. Este proceso se ha aplicado para el desarrollo de alimentos enriquecidos tales como: papas fritas fortificadas con calcio vitamina C y E (Duarte-Correa et al., 2020), azufaifo impregnado con  $\text{CaCl}_2$  y pectina metilestearasa (Zhang et al., 2019), manzanas impregnadas con lactato de calcio (Assis et al., 2019), cáscaras de naranja impregnadas con proteínas de lactosuero (Andamay y Acosta, 2020) y cidra impregnada con inulina y calcio (Mejía-Doria et al., 2019). Se resalta la efectividad en el control del color para las diferentes matrices alimentarias en las que se ha utilizado, como en la cocona impregnada con AC (Dávila, 2020). En este contexto, el objetivo de la presente investigación fue optimizar [experimentalmente] una formulación de antioxidantes, con la técnica de IV, para mejorar el color de unos palmitos de iraca (PI) con diámetros entre 10-12 mm y longitud de 4 cm.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron PI [*Carludovica palmata*] cultivados en la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín ( $6^{\circ} 15' 44''$  N  $75^{\circ} 34' 37''$  O, altitud 1495 m s. n. m., a una temperatura promedio entre  $28^{\circ}\text{C}$  /  $17^{\circ}\text{C}$  y 65,0 % de HR). Se seleccionaron tallos de 50 a 70 cm de longitud, tomados desde la parte basal del tallo, halando hacia arriba para no provocar rupturas en los PI. Las formas cilíndricas para impregnar presentaron diámetros entre 10-12 mm y se cortaron a una longitud de 4 cm desde la base del tallo. El LI que se utilizó como base fue una solución isotónica de NaCl [0,6 %] adicionada con: EDTA [obtenido de Smart Chemical], en una proporción de 75 mg por cada 1000 g de PI]; AC [producido por Weifang Ensign Industry Co., Ltd.]; AA fabricado por CSPC Weisheng Pharmaceutical] y BS [elaborado por Brenntag].

### *Proceso de IV*

Se utilizó una cámara en acero inoxidable que tiene acoplada una bomba de vacío Dosivac DVR 140. El proceso se llevó a cabo con una presión de vacío de 4,1 kPa ( $P_1$ ) y una presión final de impregnación ( $P_2$ )  $\cong$  equivalente a la presión barométrica de Medellín (85,3 kPa). Además, la evolución del peso de la muestra durante todo el procedimiento se registró con una balanza ( $\pm 0,01$  g). El proceso IV consistió, en primera medida, en sumergir la muestra en la solución de impregnación; luego el sistema fue sometido a la  $P_1$  durante el tiempo en la etapa de vacío ( $t_1 = 4,5$  min); posteriormente, se restableció la  $P_2$ , manteniéndose la muestra sumergida durante el tiempo en esta etapa ( $t_2 = 4,0$  min).

Para la evaluación del proceso, se utilizó la metodología de superficie de respuesta, con un diseño central compuesto cara centrada ( $\alpha = 1$ ) (20 Corridas), considerando las VI mencionadas antes : AC [100-300 mg por cada 100 g PI], AA [12-24 mg por cada 100 g de PI] y BS [500-1500 ppm]. Las VD consideradas fueron: fracción volumétrica de impregnación y deformación volumétrica, tanto en la etapa de vacío a  $P_1$  [ $X_1$ :  $\text{m}^3$  de LI/ $\text{m}^3$  PI y  $g_1$ :  $\text{m}^3$  de muestra deformada/ $\text{m}^3$  PI, respectivamente] como en el proceso global con el restablecimiento de la  $P_2$  [ $X$ :  $\text{m}^3$  de LI/ $\text{m}^3$  PI y  $g$ :  $\text{m}^3$  de muestra deformada/ $\text{m}^3$  PI] y la porosidad eficaz [ $E_e$ :  $\text{m}^3$  de gas/ $\text{m}^3$  PI]. Las variables de impregnación se expresaron en forma porcentual.

La determinación experimental de los parámetros para la IV se realizó según la metodología descrita por Salvatori et al. (1998), y el proceso de transferencia de masa de los PI se realizó teniendo en cuenta el modelo

matemático descrito por Fito et al. (1996), expresado en las ecuaciones [Ec.] 1, 2, 3, 4 y 5 [ $X_1$ ,  $g_1$ ,  $X$ ,  $g$  y  $E_e$  respectivamente]. De acuerdo con lo anterior,  $m_0$  [kg] es la masa inicial del PI,  $m_1$  [kg] es la masa de LI en PI al final de la etapa de vacío,  $m_2$  [kg] es la masa de LI en PI al final del proceso de IV,  $\rho_{si}$  [kg/m<sup>3</sup>] es la densidad de la solución hipotónica de impregnación,  $V_0$  es el volumen inicial de la muestra,  $V_1$  [m<sup>3</sup>] es el volumen de la muestra al final de la etapa de vacío,  $V_2$  [m<sup>3</sup>] es el volumen del PI al final del proceso de IV, y  $r$  es la relación de compresión ( $r = P_2 / P_1$ ).

$$X_1 = (m_1 - m_0) / (\rho_{si} / V_0) \quad (\text{Ec. 1})$$

$$g_1 = (V_1 - V_0) / V_0 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$X = (m_2 - m_0) / (\rho_{si} / V_0) \quad (\text{Ec. 3})$$

$$g = (V_2 - V_0) / V_0 \quad (\text{Ec. 4})$$

$$E_e = [(X - g)r + g_1] / (r - 1) \quad (\text{Ec. 5})$$

### Color

El color en los PI, impregnados y sin impregnar, se determinó utilizando un espectrofotómetro X-RITE modelo SP64, y las condiciones eran las siguientes: iluminante D65, observador 10° y una ventana de observación de 11 mm. A partir del espectro de reflexión de las muestras se obtuvieron, en la escala cartesiana CIEL\*a\*b\* los siguientes parámetros: luminosidad ( $L^*$ ), cromaticidad verde (-) a rojo (+) ( $a^*$ ), y cromaticidad azul (-) a amarillo (+) ( $b^*$ ). El color de los PI impregnados y sin impregnar se valoraron durante 0, 1, 2 y 3 días. Para cada tiempo se tomaron 3 repeticiones [3 lecturas por muestra en la parte radial y longitudinal] y se reportó la diferencia de color [ $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$  y  $\Delta E_{\text{Radial}}$ ] según la ecuación 6, considerando los valores medios de los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  entre ambos tiempos.

$$\Delta E = [(L_0 - L_t)^2 + (a_0 - a_t)^2 + (b_0 - b_t)^2]^{1/2} \quad (\text{Ec. 6})$$

### Análisis estadístico



Los resultados se analizaron a partir del análisis de la varianza ANOVAS, aplicando el método LSD [mínimas diferencias significativas] con un nivel de significancia del 95 % [  $\alpha = 0,05$ ] y se utilizó el paquete estadístico Statgraphics Centurión XVII. Las VD asociadas a la IV se reportaron como valores medios más la desviación estándar, a partir de 3 repeticiones. Se aplicó una optimización experimental de múltiples respuestas para definir la formulación más adecuada, lo que permitió obtener una mejor respuesta a la IV y control del color en la matriz de estudio.

Las variables dependientes se modelaron con un modelo polinomial de orden 2 [ecuación 7], en el que Y es la variable dependiente,  $\beta_0$  es constante y  $\beta_A$ ,  $\beta_B$  y  $\beta_C$  son los coeficientes lineales;  $\beta_{AB}$ ,  $\beta_{AC}$  y  $\beta_{BC}$  son los coeficientes de interacción de los factores lineales y  $\beta_{A^2}$ ,  $\beta_{B^2}$  y  $\beta_{C^2}$  son los coeficientes cuadráticos. El ajuste del modelo se realizó mediante el método de falta de ajuste y el coeficiente de regresión [ $R^2$ ]. Las variables dependientes para cada experimento se obtuvieron por triplicado en diferentes tiempos de proceso. Los valores experimentales, en condiciones óptimas, se obtuvieron en 3 repeticiones y se compararon con el valor teórico del modelo matemático para verificar la precisión del modelo.

$$Y = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_C C + \beta_{AB} AB + \beta_{AC} AC + \beta_{BC} BC + \beta_{A^2} A^2 + \beta_{B^2} B^2 + \beta_{C^2} C^2 \quad (\text{Ec. 7})$$

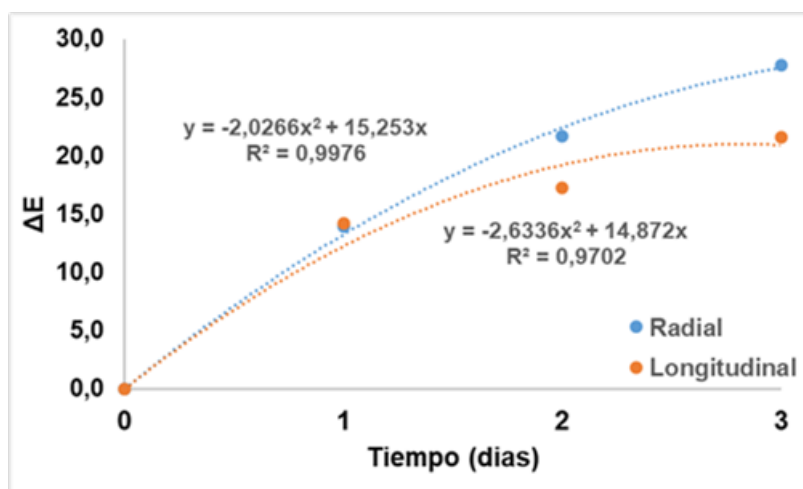
Por otro lado, se realizó una optimización experimental de múltiples respuestas, teniendo en cuenta los resultados del ANOVA y fijando criterios, pesos e impactos en las variables dependientes que favorezcan la calidad. La validación de los modelos se realizó a partir del error medio relativo [EMR] [Ecuación 8], comparando los valores de la variable dependiente predicha y la experimental a la condición óptima.

$$EMR = \left| \frac{\text{Valor teórico} - \text{Valor experimental}}{\text{Valor teórico}} \right| \times 100 \quad EMR = \left| \frac{\text{Valor teórico} - \text{Valor experimental}}{\text{Valor teórico}} \right| \times 100 \quad (\text{Ec. 8})$$

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Caracterización del color de los PI

La figura 1 presenta la cinética del  $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$  y  $\Delta E_{\text{Radial}}$  de los PI sin impregnar [almacenados a 4 °C, sin empaque y bajo refrigeración], observándose que  $\Delta E_{\text{Radial}} > \Delta E_{\text{Longitudinal}}$  presentaron un crecimiento polinómico de orden 2 [ $R^2 = 0,998$  y  $0,970$  respectivamente]), en el que la rapidez de cambio es mayor durante el periodo entre 0 y 1 día, evidenciándose el pardeamiento que experimenta la matriz alimentaria de PI. Para el  $\Delta E_{\text{Radial}}$ , la variación del color fue así: L\* [52,2 → 25,9], a\* [0,1 → 7,4] y b\* [12,6 → 7,5]; mientras que para  $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$ , los resultados fueron: L\* [47,1 → 25,9], a\* [0,4 → 3,9] y b\* [5,3 → 4,0].



**Figura 1.**

Cinética de  $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$  y  $\Delta E_{\text{Radial}}$  de los PI sin impregnar. autores.

Estos resultados identifican al color, como una propiedad crítica en la definición de la vida útil de los PI mínimamente procesados. Cuando las muestras son expuestas a temperaturas de 4 °C, el oscurecimiento es evidente desde el primer día y de forma muy heterogénea, por lo que los PI requieren de la implementación de un tratamiento preliminar que controle su pardeamiento; el cual es función de la PPO activa presente en la matriz (Cardona, 2020).

Por otra parte, los  $\Delta E_{\text{Radial}}$  son atribuidos principalmente al corte de cizalla proporcionado por el cuchillo, lo cual genera rompimiento celular y libera la PPO y los componentes fenólicos, lo que en contacto con el aire cataliza el pardeamiento de los PI. Además, debido a que los PI se extrajeron del suelo de forma vertical, se generó una tensión longitudinal que destruyó los compartimentos celulares, promoviendo el pardeamiento, en forma heterogénea, de la zona longitudinal y radial (Uscanga-Sosa et al., 2019).

#### *Proceso IV de PI con soluciones antioxidantes*

La tabla 1 presenta los valores p del ANOVA, lo cual identifica un importante efecto de las VI seleccionadas sobre las VD. De acuerdo con esto, la g1 presentó diferencias estadísticas significativas ( $p < 0,05$ ) con respecto al AA y a la interacción BS-AA; la  $X_1$ , con respecto a la interacción BS-AA; la g, con respecto a BS; y las variables X y Ee con respecto a las interacciones BS-AA y CA-AA. Por otro lado,  $\Delta E_{\text{Radial}}$  y  $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$  al tercer día, no presentaron diferencias estadísticas significativas ( $p > 0,05$ ) con las VI, ni con sus interacciones lineales o cuadráticas. Esto ocurrió debido a los altos coeficientes de variabilidad generados por las reacciones enzimáticas que ocurren y a su correlación con otras propiedades que se modifican durante el proceso de IV: microestructurales, morfológicas, mecánicas, ópticas, entre otras.

TABLA 1.  
Valores p del ANOVA en el proceso de IV de los PI.

Interacción	g <sub>1</sub>	X <sub>1</sub>	g	X	Ee	$\Delta E_{Longitudinal}$	$\Delta E_{Radial}$
BS	0,2599	0,8315	0,0297*	0,4078	0,4766	0,6648	0,3901
AC	0,4226	0,7182	0,8729	0,3167	0,2875	0,5735	0,7177
AA	0,0293*	0,6924	0,3173	0,5759	0,9656	0,7080	0,6921
BS <sup>2</sup>	0,9706	0,0984	0,5610	0,2908	0,4173	0,0920	0,7606
BS-AC	0,4618	0,8577	0,6240	0,8373	0,9395	0,2969	0,6699
BS-AA	0,0061*	0,0017*	0,5306	0,0036*	0,0025*	0,9643	0,1371
AC <sup>2</sup>	0,4004	0,1759	0,4645	0,1292	0,1951	0,2831	0,6335
AC-AA	0,5659	0,0837	0,7176	0,0490*	0,0177*	0,9318	0,9582
AA <sup>2</sup>	0,6849	0,1219	0,0953	0,1031	0,4617	0,0910	0,1588

autores.

g<sub>1</sub>: deformación volumétrica en la etapa de vacío; X<sub>1</sub>: fracción volumétrica en la etapa de vacío; g: deformación volumétrica al final del proceso; X: fracción volumétrica en la etapa final; Ee: porosidad eficaz;  $\Delta E_{Longitudinal}$ : cambios de color longitudinal;  $\Delta E_{Radial}$ : cambios de color radial. \* Significancia estadística (p < 0,05).

*Fracción volumétrica de impregnación en la etapa de vacío y final*

La figura 2 presenta los gráficos de volumen de respuesta para X<sub>1</sub> y X en función de las VI. Los valores medios de X<sub>1</sub> fluctuaron entre 14,0-19,7 %, lo cual denota un importante ingreso del LI en la matriz porosa durante la etapa de vacío. El comportamiento de la X<sub>1</sub> no presentó una tendencia bien definida y las formulaciones más favorables para alcanzar los mayores valores de X<sub>1</sub> [zona roja] fueron: 1) AA [12–14 mg por cada 100 g de PI], BS [1 100–1 500 ppm] y AC [100-220 mg por cada 100 g PI]; 2) AA [22–24 mg por cada 100 g de PI], BS [500-900 ppm] y AC [140-300 mg por cada 100 g de PI]. Otros valores positivos de X<sub>1</sub> se reportaron en cáscara de naranja (Duque et al., 2011).

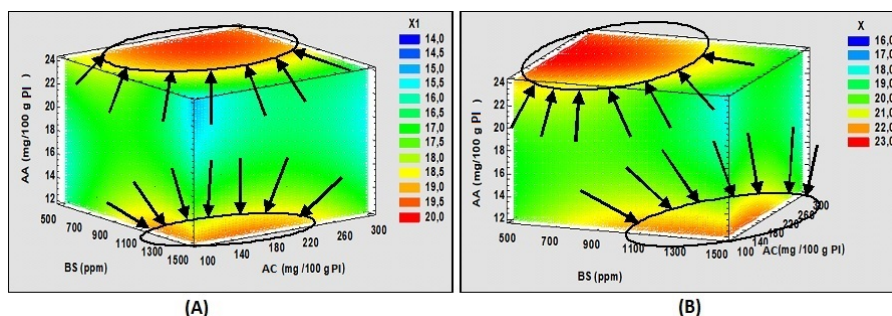


FIGURA 2.  
X<sub>1</sub> (figura 2A) y X (figura 2B) en el proceso de IV de los PI.

autores.

Por otro lado, el comportamiento de X fue muy similar a X<sub>1</sub>, lo que induce a pensar que existe un efecto asociativo y progresivo que hace que los valores medios de X se hayan incrementado hasta el rango de 16,6-22,5 %. De acuerdo con el gráfico de volumen de respuesta (Figura 2B), este incremento de transferencia de masa durante la etapa P<sub>2</sub> está principalmente relacionado con: 1) la interacción negativa BS-AA en todo el rango de BS, representada en menores concentraciones de BS [500–900 ppm] y altas concentraciones de AA [22–24 mg por cada 100 g de PI]; 2) la interacción positiva AA-AC a bajas concentraciones de AA [12–14 mg por cada 100 g de PI] y AC [100–180 mg por cada 100 g de PI].

Dado que X está directamente relacionado con la cantidad de LI al interior de la estructura, la maximización de esta variable contribuye a incrementar el peso de las muestras y los niveles de antioxidantes,



retrasando el pardeamiento de PI. Niveles de X similares han sido reportados por Derossi et al. (2021) en manzanas Granny Smith y por Assis et al. (2019) en manzanas Malus spp. En general, el comportamiento de X y  $X_1$  está afectado por el mecanismo hidrodinámico [HDM] causado por los cambios de presión [P1 → P2], lo que genera la transferencia de masa de LI hacia el interior de la matriz, hasta alcanzar un equilibrio.

*Deformaciones volumétricas y porosidad eficaz al proceso IV*

La Figura 3 presenta los gráficos de volumen de respuesta para  $g_1$ , g y Ee; en esta figura se observa que los valores medios fluctuaron entre -0,7 y 1,4 %, -1,4 y 1,9 % y 16,6 y 22,5 %, respectivamente. En general, los resultados de  $g_1$  y g denotan que la matriz experimentó contracciones y expansiones volumétricas durante el proceso; mientras que los resultados de Ee fueron coherentes con los valores de X, lo que demuestra la eficacia del proceso para la incorporación del LI al interior de la matriz (Fito et al., 1996).

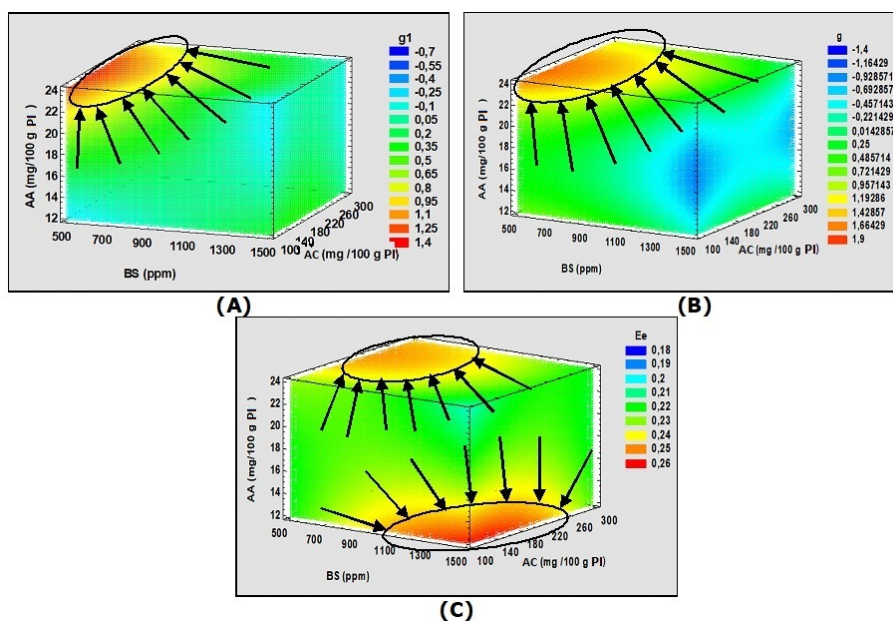


FIGURA 3.

$g_1$  (figura 3A), g (figura 3B) y Ee (figura 3C) en el proceso de IV de los PI. autores.

Los gráficos de volumen de respuesta (Figura 3A) para  $g_1$  resaltan principalmente la expansión volumétrica de los PI [zona roja y valores positivos], cuando el contenido de AA incrementa en las formulaciones. Esta situación ocurre en formulaciones con altos contenidos de AA [18–24 mg por cada 100 g de PI] y bajos contenidos de BS [500–900 ppm] e independientemente de la concentración de AC. Sin embargo, el comportamiento de  $g_1$  denota un importante volumen en la zona verde amarillosa, la cual identifica los PI con una deformación despreciable [ $\cong 0$  %], de manera que resulta favorable por la mayor similitud al alimento original. Estos valores son similares a los reportados por Cortés-Rodríguez et al. (2018) en uchuva.

En general, las condiciones de proceso impuestas aseguran algo de deformación de la estructura, debido a la buena resistencia mecánica de los PI [ $g \cong 0$ ] [zona verde]. Esto garantiza una estructura similar al producto original y una mayor retención del LI en su interior, gracias al acople del HDM y del fenómeno de deformación-relajación (Rodríguez-Barona et al., 2019). Los gráficos resaltan principalmente una expansión volumétrica [zona roja] cuando las formulaciones presentan una disminución del BS [500–900 ppm], con niveles de AA de 22–24 mg por cada 100 g de PI y en todo el rango de AC.

Por otro lado, los PI impregnados experimentan la mayor contracción volumétrica [zona azul] cuando las formulaciones presentan un incremento en el BS [1100–1500 ppm], con niveles de AA de 12–20 mg por cada 100 g de PI y en rangos altos [260–300 mg por cada 100 g de PI] y bajos [100–180 mg por cada 100 g de PI] de AC. Valores similares de g han sido reportados por Cortés-Rodríguez et al. (2018) en uchuva [-2.2 %]

y por Salvatori et al. (1998) en manzana Granny Smith, manzana Red Chief, Kiwi Hayward y albaricoque [-0,6 %, -2,4 %, 1,09 % y 2.01 % respectivamente].

Con respecto a la Ee, no se observó una tendencia bien definida causada por las VI estudiadas. Sin embargo, existen dos zonas [rojas] que maximizan los valores de Ee, lo cual es favorable para el proceso de IV en los PI: 1) BS [1200–1500 ppm], AA [12–14 mg por cada 100 g de PI] y AC [100-220 mg por cada 100 g de PI]; 2) BS [500-800 ppm], AA [22–24 mg por cada 100 g de PI] y AC [200-300 mg por cada 100 g de PI]. Los resultados encontrados de Ee son similares a los reportados en manzanas de la variedad Granny Smith por Derossi et al. (2021).

#### *Cambios de color radial y longitudinal de los PI impregnados*

La figura 4 presenta los gráficos de volumen de respuesta de  $\Delta E_{\text{Radial}}$  y  $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$  en función de las VI, allí se muestra que los valores medios fluctuaron entre 7,0–36,7 y 3,8–32,4 respectivamente. Esta variabilidad, en los  $\Delta$ color en ambas zonas, podría atribuirse a fenómenos fisiológicos de respiración en los PI durante el tiempo de almacenamiento, la cual se relaciona con procesos de degradación celular y oxidación (Zapata et al., 2021).

Por otro lado, las rupturas celulares que experimentan los PI durante la recolección, sumado al stress mecánico que producen las expansiones/contracciones durante el proceso IV, contribuyen en los cambios de color (Uscanga-Sosa et al., 2019). Adicionalmente, el proceso IV modifica el color, dado que el LI ocupa los espacios intercelulares y esto modifica el índice de refracción superficial (Cortés-Rodríguez et al., 2016). Aunque el ANOVA no evidenció diferencias significativas en  $\Delta E_{\text{Radial}}$  y  $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$  con respecto a las VI, los gráficos evidencian los menores #color en la zona azul. Para el  $\Delta E_{\text{Radial}}$  y  $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$ , las formulaciones que más los favorecieron fueron altos niveles de BS [1500 ppm] y todos los rangos de AA y AC; además, el  $\Delta E_{\text{Radial}}$  también se favoreció con fórmulas de AA [12–22 mg por cada 100 g de PI] y todo el rango de AC.

Se observa que la principal incidencia sobre el color la realizan los iones  $S_2O_5^{2-}$ , los cuales actúan como agentes blanqueadores, produciendo formas sulfónicas que inhiben las reacciones enzimáticas de oscurecimiento, debido a la enzima PPO al reducir las o-quinonas a o-difenoles no coloreados (Li et al., 2021). Sin embargo, el mecanismo molecular de su inhibición sigue siendo desconocido. Este efecto puede verse potenciado por la acción del AA y el AC, ya que estos son altamente efectivos en la inhibición del pardeamiento, al reducir las quinonas producidas por la PPO a fenoles, antes de que la reacción de formación de pigmentos tenga lugar (Pinto, 2010). La incorporación de AA y AC reduce el pH, lo que puede llevar a la inactivación de la PPO o a reducir su actividad enzimática (Quispe et al., 2021).

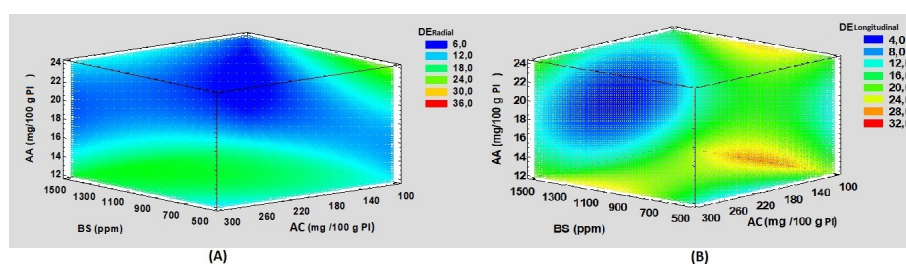


FIGURA 4.  
 $\Delta E_{\text{Radial}}$  (figura 4A) y  $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$  (figura 4B) en el proceso de IV de PI.  
autores.

#### *Modelación y optimización del proceso IV*

La tabla 2 presenta los coeficientes de regresión [ $R^2$ ], los coeficientes estimados por el modelo cuadrático de superficie de respuesta y la prueba de bondad de ajuste. En general, las VD presentaron bajos valores en los ajustes de regresión [ $R^2$ : 0,391–0,756], en los que  $\Delta E_{\text{Radial}}$  y  $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$  presentaron los menores valores, debido a la alta variabilidad comentada. Se resalta que todas las VD presentaron una distribución aleatoria de los residuos, lo cual permite asegurar que los datos pueden parametrizarse según una distribución

normal y que los modelos puedan considerarse aceptables para describir el comportamiento de los resultados encontrados.

Con el fin de optimizar el proceso de IV para los PI, se establecieron los siguientes criterios: minimizar  $X_1$  [ $<$  salida de líquidos nativos],  $\Delta E_{\text{Radial}}$  y  $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$  [ $\cong$  color de los PI], maximizar  $X$  y  $E_e$  [ $>$  incorporación de LI], y se fijó  $g_1$  y  $g$  en 0 dada la rigidez mecánica de los PI. La optimización experimental presentó una deseabilidad del 75,2 %, proporcionando la formulación siguiente: SB [1500 ppm], AA [16,5 mg por cada 100 g de PI] y CA [165,8 mg por cada 100 g de PI]. Con relación a esto, la tabla 3 presenta los criterios, pesos e impactos de las VD que se tuvieron en cuenta para la validación de la optimización con múltiples respuestas para los PI; además, presenta los resultados teóricos obtenidos por los modelos polinómicos de 2º orden y los resultados experimentales obtenidos en la condición óptima, determinada a partir de 3 réplicas.

En los resultados se observa que  $X_1$ ,  $X$  y  $E_e$  presentaron valores de error medio relativo [EMR] menores a 13 %, por lo que se considera que el modelo de optimización de respuesta múltiple presenta un nivel aceptable de predicción de datos experimentales. Sin embargo, los valores de EMR fueron superiores al 20 % para los parámetros  $g$  y  $g_1$ , lo cual es atribuible a la poca variabilidad que estos presentaron y a las deformaciones volumétricas negativas y positivas, que hacen que las diferencias entre los valores del modelo y los del experimento sea porcentualmente alta. Para  $\Delta E_{\text{Radial}}$  y  $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$ , los valores del EMR fueron lo esperado, debido a la heterogeneidad del pardeamiento que experimentan los tejidos en cada zona.

TABLA 2.  
Coeficiente de regresión ( $R^2$ ) y los coeficientes de los modelos de probabilidad de las VD.

Coefficientes	$g_1$	$X_1$	$g$	$X$	$E_e$	$\Delta E_{\text{Radial}}$	$\Delta E_{\text{Longitudinal}}$
$\beta_0$	-209,578	139,335	430,545	214,289	193,094	419,814	948,072
$\beta_A$	0,002206	0,0179184	0,00134904	0,0139629	0,014767	0,0307333	0,0592748
$\beta_B$	0,00264898	0,0148738	0,0125162	0,012569	0,000464659	0,0767175	-0,294983
$\beta_C$	0,0853182	-0,722505	-0,643045	-0,967752	-0,359944	-583,965	-905,251
$\beta_A^2$	-3.53E-03	-0,00000439	-9.98E-02	-0,000003	-0,000002289	-0,000006191	-0,00003497
$\beta_B^2$	-0,0000205	-0,00008775	-0,000031545	-0,0001109	-0,00009393	-0,000243018	0,000532191
$\beta_C^2$	0,00271338	0,0282904	0,0212235	0,03342550	0,0143813	0,209023	0,243664
$\beta_{AB}$	0,00000210	-0,0000013	0,00000246	0,00000166	-6.18E-04	0,0000254525	0,000060545
$\beta_{AC}$	-0,0001582	-0,00050067	-0,00005267	-0,0004954	-0,00053004	-0,00156104	0,0000420833
$\beta_{BC}$	0,00013562	0,00113083	-0,00015083	0,00146854	0,00187438	0,000259792	0,0004025
$R^2$	69,2	75,6	54,1	73,5	75,4	39,1	48,3

autores.

$g_1$ : deformación volumétrica en la etapa de vacío;  $X_1$ : fracción volumétrica en la etapa de vacío;  $g$ : deformación volumétrica al final del proceso;  $X$ : fracción volumétrica en la etapa final;  $E_e$ : porosidad eficaz;  $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$ : cambios de color longitudinal;  $\Delta E_{\text{Radial}}$ : cambios de color radial.

TABLA 3.  
Optimización experimental con múltiples respuestas para el PI.

Variable dependiente	Criterios	Peso	Impacto	Óptimo teórico	Óptimo experimental	EMR (%)
$g_1$ (%)	0	0,5	3	0,132	0,099	24,8
$X_1$ (%)	Maximizar	0,5	4	17,1	19,305	12,9
$g$ (%)	0	0,5	3	-0,645	0,843	230,6
$X$ (%)	Maximizar	1	5	20,0	21,246	6,2
$E_e$ (%)	Maximizar	1	5	23,6	23,383	0,9
$\Delta E_{\text{Radial}}$	Minimizar	3,0	5	9,138	17,595	92,5
$\Delta E_{\text{Longitudinal}}$	Minimizar	3	5	4,918	8,27	68,1

autores.

La figura 5 el  $DE_{\text{Radial}}$  y el  $DE_{\text{Longitudinal}}$  de los PI impregnados con la solución óptima de antioxidante, durante 3 días de almacenamiento a 4°C y sin empaque. Se observa que  $DE_{\text{Radial}} > DE_{\text{Longitudinal}}$  tienen valores altos en todos los tiempos, pero menores a los obtenidos por los PI sin impregnar, lo cual hace evidente la acción de los antioxidantes en el control del pardeamiento enzimático. El  $DE_{\text{Radial}}$  presentó un crecimiento lineal, con orden de reacción cero, y con buen ajuste de regresión [ $R^2 = 96,8\%$ ]); mientras que el  $DE_{\text{Longitudinal}}$  presentó un crecimiento polinómico de orden 2, igualmente con excelente ajuste de regresión [ $R^2 \cong 100\%$ ].

Para finalizar, puede afirmarse que los PI impregnados con la solución de antioxidantes experimentan una disminución importante de  $\Delta E_{\text{Radial}}$  y  $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$ . Sin embargo, los fenómenos de pardeamiento continúan presentándose en las condiciones de almacenamiento de este experimento. De acuerdo con esto, los parámetros de color en la escala CIE-L\*a\*b\* fueron: 1) para la zona radial: L\* [53,1 → 36,4], a\* [-1,9 → 1,0] y b\* [5,0 → 9,6]; 2) para la zona longitudinal: L\* [37,8 → 31,1], a\* [-0,2 → 3,0] y b\* [3,3 → 6,4].

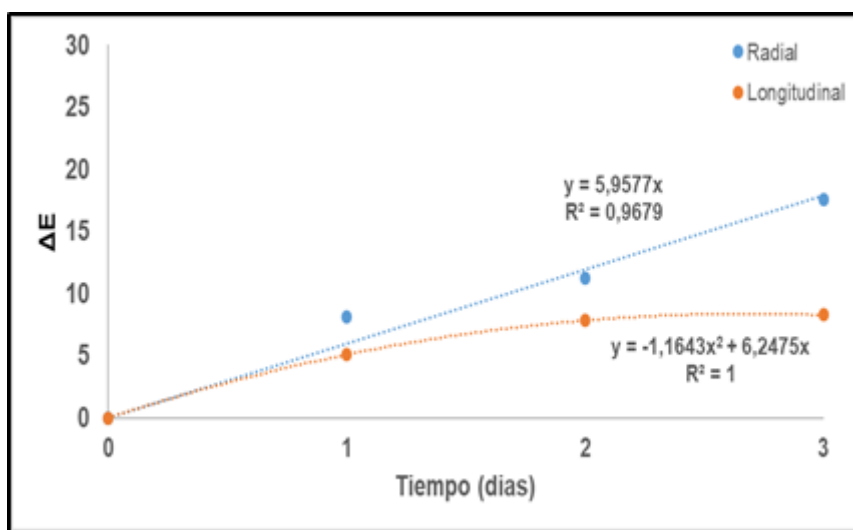


FIGURA 5.

$\Delta E_{\text{Radial}}$  y  $\Delta E_{\text{Longitudinal}}$  de los PI impregnados con la formulación óptima. autores.

#### 4. CONCLUSIONES

Los PI mínimamente procesados experimentan fenómenos de pardeamiento enzimático que limita su vida útil. Por eso, la aplicación del proceso de IV a estos PI, utilizando soluciones de antioxidantes [AA, AC, BS y EDTA], buscaba solucionar esta situación. La técnica IV utilizada permitió la incorporación de los antioxidantes hasta el interior de la estructura de los PI, lo cual logró que el tratamiento fuese efectivo para inhibir el pardeamiento en las zonas radial y longitudinal. En general, la respuesta a la IV de los PI fue positiva. Sin embargo, está afectada por la composición de los antioxidantes utilizados y por otros factores no considerados [ambientales y de cosecha], los cuales pueden estar afectando los resultados obtenidos. Por otra parte, el uso de herramientas estadísticas permitió la realización de una optimización experimental de múltiples respuestas.

Respecto a la materia prima utilizada, es preciso mencionar que, aunque la palma de Iraca ha sido utilizada, principalmente, para la elaboración de artesanías, con esta investigación se espera, además de generar de nuevo conocimiento, impulsar nuevas formas de uso y consumo de esta planta que permitan fomentar el desarrollo de la agroindustria y darle valor agregado.



## AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación [Minciencias] y a la Universidad Nacional de Colombia por la financiación del macroproyecto que permitió el desarrollo de la presente investigación.

## LITERATURA CITADA

- Andamay, M. y Acosta L, E. (2020). Impregnación al vacío de proteínas de lactosuero concentrado en las cáscaras de naranja valencia (*Citrus sinensis*). *Revista Chilena de Nutrición*, 47(6), 975–982. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182020000600975>
- Assis, F. R., Rodrigues, L. G. G., Tribuzi, G., De Souza, P. G., Carciofi, B. A. M. & Laurindo, J. B. (2019). Fortified apple (*Malus spp.*, var. Fuji) snacks by vacuum impregnation of calcium lactate and convective drying. *LWT*, 113, 108298. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2019.108298>
- Bata, M. H., Zhang, C., Peng, S., Kong, X., Chen, Y., Li, H., Li, X., Luo, H. & Yu, L. (2021). Combination of sodium alginate-based coating with L-cysteine and citric acid extends the shelf-life of fresh-cut lotus root slices by inhibiting browning and microbial growth. *Postharvest Biology and Technology*, 175, 111502. <https://doi.org/10.1016/J.POSTHARVBIO.2021.111502>
- Cardona, F. (2020). Alteraciones enzimáticas en alimentos: el pardeamiento, el enranciamiento y la reacción de Maillard. <https://riunet.upv.es/handle/10251/147166>
- Celus, M., Kyomugasho, C., Keunen, J., Van, A. M., Grauwet, T. & Hendrickx, M. E. (2020). Simultaneous use of low methylesterified citrus pectin and EDTA as antioxidants in linseed/sunflower oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*, 100, 105386. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2019.105386>
- Cortés-Rodríguez, M., Cabrera, Y. A. y Ortega Toro, R. (2018). Efecto del almacenamiento sobre uchuva adicionada con componentes fisiológicamente activos y deshidratada por aire caliente. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 21(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.989>
- Cortés-Rodríguez, M., Herrera-Herrera, E. A. y Gil-González, J. H. (2016). Impregnación de uchuva (*Physalis peruviana L.*) de forma semiesférica con una emulsión fortificante. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(1), 27-36. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)27-36](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)27-36)
- Das, A., Cumming, R. G., Naganathan, V., Blyth, F., Le Couteur, D. G., Handelsman, D. J., Waite, L. M., Ribeiro, R. V. R., Simpson, S. J. & Hirani, V. (2021). Dietary and supplemental antioxidant intake and risk of major adverse cardiovascular events in older men: The concord health and ageing in men project. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 31(4), 1102–1112. <https://doi.org/10.1016/J.NUMECD.2020.11.032>
- Dávila, L. T. P. (2020). Efecto de diferentes concentraciones de ácido cítrico como antipardeante en Cocona Ecotipo III (*Solanum sessiliflorum Dunal*) mínimamente procesada [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ucayali]. Repositorio Institucional UNU. <http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/4200>
- Derossi, A., Francavilla, M., Monteleone, M., Caporizzi, R. & Severini, C. (2021). From biorefinery of microalgal biomass to vacuum impregnation of fruit. A multidisciplinary strategy to develop innovative food with increased nutritional properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 70, 102677. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2021.102677>
- Duarte-Correa, Y., Díaz-Osorio, A., Osorio-Arias, J., Sobral, P. J. A. & Vega-Castro, O. (2020). Development of fortified low-fat potato chips through Vacuum Impregnation and Microwave Vacuum Drying. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64, 102437. <https://doi.org/10.1016/J.IFSET.2020.102437>
- Duque, A. M., Rodríguez, E. y Manjarrés, K. (2011). Cortezas de naranja comestibles: una aproximación al desarrollo de productos con valor agregado a partir de residuos agroindustriales. *Producción + Limpia*, 6(2), 47–57.
- Feng, H., Liu, J., Qaitoon, A., Meng, Q., Sultanbawa, Y., Zhang, Z., Xu, Z. P. & Zhang, R. (2021). Responsive small-molecule luminescence probes for sulfite/bisulfite detection in food samples. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 136, 116199. <https://doi.org/10.1016/J.TRAC.2021.116199>



- Fernández, C. E. y Mendoza, Y. M. (2018). Estudio de pre-factibilidad en la producción, transformación y distribución de productos elaborados a partir del cogollo de la planta iraca a nacuna [Tesis de pregrado, Fundación Universitaria San Mateo]. Centro académico de opciones de grado básicas y aplicadas. <http://caoba.sanmateo.edu.co/jspui/handle/123456789/80>
- Fito, P., Andrés, A., Chiralt, A. & Pardo, P. (1996). Coupling of Hydrodynamic Mechanism and deformation-relaxation phenomena during vacuum treatments in solid porous food-liquid systems. *Journal of Food Engineering*, 27(3), 229-240. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00005-4](https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00005-4)
- Jeong, S., Lee, H. G., Cho, C. H. & Yoo, S. R. (2020). Characterization of multi-functional, biodegradable sodium metabisulfite-incorporated films based on polycarprolactone for active food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 25, 100512. <https://doi.org/10.1016/J.FPSL.2020.100512>
- Li, F., Fu, Y., Li, J. & Tang, Y. (2021). Structure analysis and inhibition mechanism of peroxidase in “Zhongshu 1” sweet potato. *Process Biochemistry*, 100, 161–170. <https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2020.10.004>
- Mejía-Doria, C. M., Orozco-Parra, J., Hernando, I. M. y Rodríguez-Barona, S. (2019). Impregnación a Vacío de Matrices de Cidra con Pulpa de Lulo, Inulina y Calcio para Potenciar sus Características Funcionales. *Información Tecnológica*, 30(3), 211–218. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000300211>
- Pinto, L. M. (2010). Caracterización de los atributos de calidad durante el almacenamiento del banano verde (*Musa cavendish*) mínimamente procesado impregnado al vacío con soluciones antipardeantes [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional UN. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/70308>
- Quispe, F., Villa, Y., Bravo, N., Castro, O., Santiago, J. y Guerrero, M. (2021). Evaluación de la actividad sinérgica entre quitosano de pluma de pota (*Dosidicus Gigas*) y ácido cítrico en el pardeamiento de la pulpa de chirimoya (*Annona Cherimola* Mill.). *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 87(3), 261-277. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v87i3.352>
- Rodríguez-Barona, S., Cuaspud, J. A. y Giraldo, G. I. (2019). Efecto del Pretratamiento con Deshidratación Osmótica en la Impregnación a Vacío de Láminas de Banano para el Desarrollo de un Alimento Funcional. *Información Tecnológica*, 30(4), 51–58. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000400051>
- Salas-Pérez, L., Borroel-García, V. J., Ramírez-Aragón, M. G. y Moncayo-Luján, M. R. (2018). Efecto de la adición de ácido ascórbico y té de composta en la producción y capacidad antioxidante de forraje hidropónico de maíz. *Nova Scientia*, 10(20), 47–63. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i20.1168>
- Salvatori, D., Andrés, A., Chiralt, A. & Fito, P. (1998). The response of some properties of fruits to vacuum impregnation. *Journal of Food Process Engineering*, 21(1), 59-73. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.1998.tb00439.x>
- Shiekh, K. A., Benjakul, S. & Gulzar, S. (2021). Impact of pulsed electric field and vacuum impregnation with Chamuang leaf extract on quality changes in Pacific white shrimp packaged under modified atmosphere. *LWT*, 149, 111899. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2021.111899>
- Uscanga-Sosa, D. P., Pérez-Gago, M. B., Hernández-Cázares, A. S., Herrera-Corredor, J. A., Gómez-Merino, F. C. y Contreras-Oliva, A. (2019). Efecto de antioxidantes y ph en la calidad y actividad de la polifenol oxidasa de berenjena (“*Solanum melongena*” L.) mínimamente procesada. *Agrociencia*, 53(2), 175–189. <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/1759/1759>
- Viola, L., Noel, G. y Defagó, M. D. (2020). De nutrientes a patrones alimentarios: cambio de paradigma en el abordaje nutricional de las enfermedades cardiovasculares. *Perspectivas En Nutrición Humana*, 22(1), 101–111. <https://doi.org/10.17533/UDEA.PENH.V22N1A08>
- Zapata, J. E., Agudelo-Cuartas, C., y Restrepo, C. E. (2021). Modelación de la tasa de respiración del mango cortado osmodeshidratado en un sistema cerrado. *Información Tecnológica*, 32(1), 3–16. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642021000100003>
- Zhang, L., Wang, P., Chen, F., Lai, S., Yu, H. & Yang, H. (2019). Effects of calcium and pectin methylesterase on quality attributes and pectin morphology of jujube fruit under vacuum impregnation during storage. *Food Chemistry*, 289, 40–48. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2019.03.008>

## ENLACE ALTERNATIVO

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/6014> (html)

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/6014/5955> (pdf)