



Evaluación de la dinámica de impregnación al vacío de cogollos de palma de iraca

Evaluation of the dynamics of vacuum impregnation of iraca palm buds

Misael Cortes-Rodríguez¹ ; Rodrigo Hoyos-Sánchez² ; Leidy Areiza-Restrepo³ ; Cristian Camilo Ossa-Cardona^{1*}

¹Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias. Medellín - Antioquia, Colombia; e-mail: mcortesro@unal.edu.co; ccossac@unal.edu.co

²Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Grupo Biotecnología Vegetal. Medellín - Antioquia, Colombia; e-mail: rhoyos@unal.edu.co

³Universidad Nacional de Colombia. Medellín - Antioquia, Colombia; email: lareizar@unal.edu.co

*autor de correspondencia: ccossac@unal.edu.co

Cómo citar: Cortes-Rodríguez, M.; Hoyos-Sánchez, R.; Areiza-Restrepo, L.; Ossa-Cardona, C.C. 2023. Evaluación de la dinámica de impregnación al vacío de cogollos de palma de iraca. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e2380. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2380>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: julio 29 de 2022

Aceptado: junio 21 de 2023

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Aunque los cogollos de la palma de iraca pueden ser empleados como fuente para la alimentación humana, la mayoría de la información disponible es para la producción de artesanías. Se evaluó la respuesta a la impregnación al vacío (IV) de cogollos frescos de palma de iraca (CFPI), con una solución isotónica de NaCl (0,6 %). Se utilizó la metodología de superficie de respuesta, con un diseño central compuesto ($\alpha=1$), considerando las siguientes variables independientes: el diámetro de los cogollos (10-15 mm), el tiempo en la etapa de vacío T1 (3-5 minutos) a presión de vacío (4.1 kPa) y el tiempo en la etapa a presión atmosférica local (85,32 kPa), T2 (3-5 min). Las variables dependientes que se tomaron en cuenta fueron fracción volumétrica de impregnación en la etapa de vacío (X1), deformación volumétrica final (g), fracción volumétrica final (X) y porosidad eficaz (Ee). La dinámica de la IV del CFPI identificó que el proceso comporta una expansión volumétrica en la matriz, la cual, finalmente, contribuye a la transferencia de masa del líquido isotónico al interior de la estructura. La microestructura porosa del CFPI es compatible con el proceso de IV, permitiendo los siguientes parámetros de impregnación: g1 (0,451%), X1 (11,457%), g (2,569%), X (17,386%) y Ee (17,036%). La respuesta a la IV en los CFPI identifica a esta matriz alimentaria como adecuada, para la incorporación de componentes fisiológicamente activos.

Palabras clave: Alimentos funcionales; Alimentos mejorados; *Carludovica palmata*; Componentes fisiológicamente activos; Ingeniería de matrices.

ABSTRACT

Although the buds of the iraca palm could be employed as a source of human food, most of the information available is to produce handicrafts. The response to vacuum impregnation (VI) was evaluated in fresh iraca palm buds (FIPB) with an isotonic NaCl solution (0.6 %). The response surface methodology was obtained, with a central compound design ($\alpha=1$), considering the following independent variables: The diameter of the buds (10-15 mm), the time in the vacuum stage T1 (3-5 minutes) at vacuum pressure (4.1 kPa) and the time in the stage at local atmospheric pressure (85.32 kPa), T2 (3-5 min). The dependent variables considered were the volumetric fraction of impregnation in the vacuum stage (X1), the final volumetric deformation (g), the final volumetric fraction (X), and the effective porosity (Ee). FIPB VI dynamics identified that the process involves a volumetric expansion in the matrix, which ultimately contributes to the mass transfer of the isotonic liquid into the structure. The porous microstructure of the FIPB is compatible with the VI process, allowing the following impregnation parameters: g1 (0.451 %), X1 (11.457 %), g (2.569 %), X (17.386%), and Ee (17.036 %). The response to VI in FIPB identifies this food matrix as suitable for the incorporation of physiologically active components.

Keywords: *Carludovica palmata*; Functional foods; Improved foods; Matrix engineering; Physiologically active components.

INTRODUCCIÓN

La palma de Iraca (*Carludovica palmata*), también conocida como paja toquilla, lucaica, jipijapa, lucualahuma o anacuma (Jiménez-Méndez *et al.* 2023), es una planta de la familia de las Cycolanthaceae, con una altura aproximada entre 1,5 y 4,0 m y aprovechada, principalmente, para la producción de artesanías (Becerra *et al.* 2004); sin embargo, los cogollos frescos de la palma de Iraca (CFPI) son comestibles, cuando los tallos están alrededor de 0,5 a 0,7 m. Su uso alimenticio se compara con los palmitos y espárragos y representa un alimento ancestral con muchas alternativas, para el desarrollo de nuevos alimentos innovadores (Becerra *et al.* 2004).

Los alimentos con características funcionales han tomado gran interés en pro de proveer dietas energéticamente complementarias y saludables que, sin cambiar, en gran medida, sus propiedades sensoriales, promuevan la absorción de componentes fisiológicamente activos (CFA) (Salvatori *et al.* 1998). Así, los estudios en impregnación a vacío (IV) utilizan soluciones isotónicas con actividad de agua, similar a la de la matriz alimentaria, ya que garantiza una apropiada transferencia de masa entre la matriz y la solución, al mismo tiempo, que funciona como vehículo para el transporte de otras sustancias (Ossa Montoya *et al.* 2023).

La ingeniería de matrices utiliza la técnica de IV, como mecanismo de incorporación de componentes, como los CFA, al interior de los alimentos porosos (Derossi *et al.* 2012), aprovechando la composición y la estructura de la matriz, de manera que se puedan obtener alimentos mejorados, modificando su composición para proveerles, tanto propiedades funcionales como sensoriales, de una manera rápida y simple, sin la ruptura de la estructura celular (Mierzwa *et al.* 2023). El proceso IV consiste en el intercambio del gas o del líquido ocluido en los poros o espacios extracelulares por una disolución externa, mediante la acción del mecanismo hidrodinámico (MHD) (Fito *et al.* 1996), debido a la diferencia de presiones que se presentan en el sistema, que provocan la expansión del gas y el ingreso de un considerable volumen de solución a la estructura del alimento (Fito & Pastor, 1994). El sistema durante la acción del MHD experimenta cambios estructurales y fisiológicos, indicando que, conjuntamente, se pueden presentar.

La IV está afectada por diversos factores: composición del tejido, la estructura del tejido (tamaño y distribución de poros), el tiempo de relajación de la matriz sólida, el tamaño y forma de la muestra y de la velocidad de flujo del gas y del líquido durante la acción del MHD que, a su vez, depende de la estructura del tejido y de la viscosidad de la solución (Thakur & Modi, 2020). La IV promueve cambios composicionales muy rápidos en frutas y vegetales por adición a la solución de impregnación de componentes, que aseguran una mejor estabilidad del producto, al disminuir el pH y la incorporación de agentes antimicrobianos o antiparadeantes (Thakur & Modi, 2020; Rezende Abrahão & Gomes Corrêa, 2021; Cortez-Latorre *et al.* 2021; Santarelli *et al.* 2021) o la mejora de algunos atributos de calidad (Derossi *et al.* 2012; Assis *et al.* 2019; Luo *et al.* 2019; Derossi *et al.* 2021). La IV promueve, igualmente, cambios en las propiedades mecánicas, estructurales, ópticas y

térmicas, que afectan la calidad del producto final (Neri *et al.* 2019; Panayampadan *et al.* 2022). Cambios estructurales en fresa, en piña y en otras frutas promovidas por la IV han sido reportados por Duarte-Correa *et al.* (2020).

La IV ha sido aplicada con resultados positivos en procesos de fortificación de frutas y hortalizas con CFA hidrosolubles y liposolubles (Derossi *et al.* 2012; Assis *et al.* 2019; Cortez-Latorre *et al.* 2021; Panayampadan *et al.* 2022; Kręcisiz *et al.* 2023), en procesos de salado de quesos (Gonzalez *et al.* 1999; Pavia *et al.* 2000; González-Martínez *et al.* 2002; Le & Konsue, 2021), en productos cárnicos (Aykın-Dinçer, 2021; Chiralt *et al.* 2001; Ramírez *et al.* 2021) y en pescados (Tomac *et al.* 2020; Marchetti *et al.* 2022). La IV, como proceso previo a la deshidratación osmótica, aporta cambios estructurales en el tejido y modificaciones en la transferencia de masa (Le & Konsue, 2021; Mierzwa *et al.* 2022) y, además, la incorporación de crioprotectores, a partir de la IV en el proceso de congelación, contribuye a la reducción de los cambios de textura estructural y composición química (Pandiselvam *et al.* 2022; Panayampadan *et al.* 2022). Bajo este contexto, el objetivo de la investigación fue evaluar la respuesta a la IV del cogollo de la palma de Iraca, utilizando una solución isotónica a la matriz alimentaria.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron CFPI extraídos de 50 plantas cultivadas en la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (6°15'44" N 75°34'37" O, altitud 1.495 m s.n.m., a una temperatura promedio entre 28 /17 °C y 65,0 % de HR). Se seleccionaron tallos de 0,5 a 0,7 m de longitud, tomadas desde la parte basal del tallo halando hacia arriba, para no provocar rupturas en los cogollos tiernos, que fueron recortados con una altura de 0,04 m, para las pruebas de impregnación, tomando de cada tallo solo un cogollo. La preparación de la solución isotónica de impregnación se preparó con NaCl (0,6 %p/p), que corresponde a una actividad de agua (a_w), similar a los cogollos. Los diámetros se codificaron en tres rangos de tamaños: 1) 10,0 - <11,6 mm, 2) >11,6 - < 13,3 mm y 3) >13,3 - 15,0 mm.

Caracterización del CFPI. El contenido de humedad (X_w) fue determinado según el método descrito por la AOAC (1990), secando las muestras en una estufa de aire forzado, a una temperatura 105 °C, hasta alcanzar peso constante, aproximadamente, 24 horas después. Actividad de agua (a_w): se determinó con un higrómetro con punto de rocío, a 25 °C (marca Aqualab Decagón modelo CX3±0.03, Pullman, WA, USA). °Brix: se determinó según el método AOAC (1990), en un refractómetro (Atago, Tokyo, Japón), a 20 °C.

Proceso de impregnación al vacío. El proceso de IV fue realizado en una cámara de impregnación en acero inoxidable, que cuenta con una bomba de vacío Dosivac DVR 140. El proceso, se llevó a cabo con una presión de vacío de 4,06 kPa (P_1) y una presión barométrica, para la ciudad de Medellín, correspondiente a 85,32 kPa (P_2) y la evolución del peso de la muestra durante todo el

proceso se registró con una balanza con una precisión de $\pm 0,01g$. El proceso IV consistió en sumergir la muestra en la solución isotónica de NaCl al 0,6% p/p; luego, el sistema fue sometido a la P_1 durante el tiempo aplicado en la etapa de vacío, de 3 - 5 minutos; posteriormente, se restableció la P_2 , manteniéndose sumergidas durante el tiempo aplicado en esta etapa, de 3 - 5 minutos.

Los CFPI impregnados fueron caracterizados en función de los parámetros de IV y de acuerdo con el proceso de transferencia de masa, descrito según el modelo matemático, propuesto por Fito (1994) y Fito *et al.* (1996). La determinación experimental de los parámetros de impregnación se realizó según la metodología descrita por Martínez Navarrete *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 1, 2, 3, 4 y 5 (X_1 , g_1 , X , g y E_e , respectivamente).

$$X_1 = (m_1 - m_0) / (\rho_{SI} / V_0) \quad \text{ecuación 1}$$

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

$$X = (m_2 - m_0) / (\rho_{SI} / V_0) \quad \text{ecuación 3}$$

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

$$E_e = ((X - g) r + g_1) / (r - 1) \quad \text{ecuación 5}$$

Donde, m_0 (kg) es la masa inicial del CFPI; m_1 (kg), la masa del líquido impregnado del CFPI al final de la etapa de vacío; m_2 (kg), la masa de líquido impregnado en el CFPI al final del proceso de IV; ρ_{SI} (kg/m³) es la densidad de la solución hipotónica de impregnación; V_0 , el volumen inicial de la muestra; V_1 (m³) es el volumen de la muestra al final de la etapa de vacío; V_2 (m³), el volumen del CFPI al final del proceso de IV y r , la relación de compresión ($r = P_2 / P_1$).

Los resultados se analizaron a partir del análisis de la varianza ANOVA, aplicando el método LSD (mínimas diferencias significativas), con un nivel de significancia del 95 % ($\alpha=0,05$) (15 experimentos) y se utilizó el paquete estadístico Statgraphics Centurión XVII. Las variables dependientes 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 el rango de diámetro y los tiempos óptimos, lo que permitió obtener una mejor respuesta a la impregnación al vacío.

Las variables dependientes se modelaron mediante un modelo polinomial de segundo orden (ecuación 6), donde Y es la variable dependiente, β_0 es constante y β_A , β_B y β_C son los coeficientes lineales; β_{AB} , β_{AC} y β_{BC} son los coeficientes de interacción de los factores lineales y β_A^2 , β_B^2 y β_C^2 son los coeficientes cuadráticos. El modelo se ajustó mediante el método de falta de ajuste y el coeficiente de regresión (R^2). Las variables dependientes para cada experimento se obtuvieron por triplicado. 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 7), comparando los valores de la variable dependiente predicha y la experimental a la condición óptima. Los valores experimentales, en condiciones óptimas, se obtuvieron de 3 repeticiones.

$$Y = \beta_0 + \beta_A A + \beta_B B + \beta_C C + \beta_{AB} AB + \beta_{AC} AC + \beta_{BC} BC + \beta_A^2 A^2 + \beta_B^2 B^2 \quad \text{ecuación 6}$$

$$EMR = \frac{\text{valor teórico} - \text{valor experimental}}{\text{valor teórico}} \times 100 \quad \text{ecuación 7}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del cogollo fresco. Las características fisicoquímicas del CFPI presentaron valores de X_w de $93,0 \pm 1,1$ %; a_w : $0,993 \pm 0,001$ y $^{\circ}\text{Brix} = 4,6 \pm 0,1$ %, $\text{pH} = 5,8 \pm 0,0$. Estos resultados demuestran que la matriz de estudio presenta altos niveles de X_w , lo cual, es correspondiente a un alto valor de a_w , que la hace un sustrato favorable al crecimiento microbiológico, que se favorece por ser un producto con un pH de baja acidez. El contenido de sólidos solubles fue bajo y es conferido, principalmente, por carbohidratos solubles y sales minerales presentes.

Proceso de impregnación al vacío. La tabla 1 presenta los valores medios y la desviación estándar de los parámetros de IV (X_1 , g_1 , X , g y E_e) del proceso de IV del CFPI. Los resultados del ANOVA se resumen como sigue: g_1 presentó diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) respecto a las variables independientes T1 y T2 y con las interacciones lineales diámetro-T1 y diámetro-T2; la X_1 presentó diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) con respecto a la interacción lineal T1-T2; la g presentó diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) respecto a la variable independiente T2 y con las interacciones lineales diámetro-T2 y T1-T2; la E_e presentó diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) respecto a la interacción lineal de las variables independientes T1-T2. Por otro lado, la X no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$) respecto a ninguna de las variables independientes, ni con las interacciones lineales o cuadráticas.

En general, se observa una influencia importante de las variables independientes seleccionadas sobre la matriz porosa CFPI. La variable g_1 presentó fluctuaciones entre -1,5 y 1,8 %; sin embargo, los resultados identifican que durante la etapa de vacío a P_1 se ejerce, principalmente, una expansión volumétrica (valores positivos) en el CFPI, debido a que la fuerza externa aplicada genera un incremento en mayor o menor medida del volumen de la estructural y, por ende, de la porosidad. Esta expansión volumétrica dependerá de la resistencia mecánica (firmeza) que ofrece la estructura durante el tiempo de aplicación en la etapa de vacío (T1) o del estado de maduración del CFPI. Los valores medios de X_1 fluctuaron entre 2,5 y 13,0%, lo que denota ingreso de la solución isotónica de impregnación en la etapa de vacío. Este ingreso de líquido es la resultante entre las fuerzas capilares que actúan hacia el interior de la estructura, la cual, ahora, se comporta con mayor porosidad, debido a la expansión volumétrica y la fuerza que actúa en sentido contrario, hacia el exterior debido al vacío a P_1 .

La figura 1 presenta los gráficos volumen de respuesta de la g_1 y X_1 , que muestran que no existe una tendencia definida de g_1 con respecto a T_1 y T_2 ; existe una dependencia de estas con el diámetro, generando una interacción diámetro- T_1 positiva y una interacción diámetro- T_2 negativa. Esto implica que, la g_1 se incrementa a T_1

bajos y este disminuye cuando T_1 es alto; mientras que, g_1 a T_2 bajos disminuye y a T_2 altos incremente. En la figura 1, también se identifica el efecto de la interacción negativa T_1 - T_2 sobre la X_1 , observándose una tendencia de mayor ingreso de líquido de impregnación a bajos T_1 y altos T_2 .

Tabla 1. Resultados del proceso de IV de los cogollos frescos de palma de iraca (CFPI).

Experimento	Diámetro (mm)	T1 (min)	T2 (min)	g_1 (%)	X_1 (%)	g (%)	X (%)	E_e (%)
1	14,17	5	3	1,79±1,63	7,24±2,15	1,60±0,71	12,70±1,70	12,98±2,78
2	10,83	4	4	1,11±0,45	13,03±3,17	2,60±0,91	17,64±3,65	17,39±4,66
3	12,50	4	3	1,48±0,79	7,54±0,837	2,51±0,73	12,56±1,59	11,72±1,12
4	12,50	3	4	0,96±0,52	8,77±0,96	2,78±0,06	14,88±0,69	14,00±0,79
5	14,17	4	4	0,96±1,04	3,34±1,51	2,32±0,39	8,00±2,43	6,65±2,56
6	10,83	5	5	0,85±0,06	8,54±1,93	4,50±2,33	14,48±1,73	11,55±4,64
7	12,50	4	4	1,18±0,70	6,00±3,74	2,39±0,96	13,69±4,26	13,12±3,99
8	10,83	3	3	1,24±0,37	8,35±2,55	2,69±0,70	16,17±2,72	15,62±2,52
9	14,17	3	5	-1,48±1,91	2,45±7,28	0,95±1,19	10,19±1,89	10,36±1,37
10	12,50	4	4	1,67±0,13	8,10±1,22	2,71±0,25	14,47±1,96	13,71±2,48
11	12,50	4	4	0,65±0,06	8,30±0,64	2,69±0,24	14,36±0,38	13,46±0,16
12	12,50	4	4	1,18±0,72	9,95±1,09	2,83±1,35	17,83±1,43	17,35±1,28
13	12,50	4	5	1,32±0,65	8,39±1,42	2,54±1,35	13,64±1,62	12,91±0,73
14	12,50	4	4	1,20±0,31	9,09±2,08	2,38±0,59	15,13±1,32	14,77±2,22
15	12,50	5	4	0,61±0,20	6,67±0,47	2,16±0,46	13,85±1,02	13,48±1,52

Los valores presentados son la media ± desviación estándar.

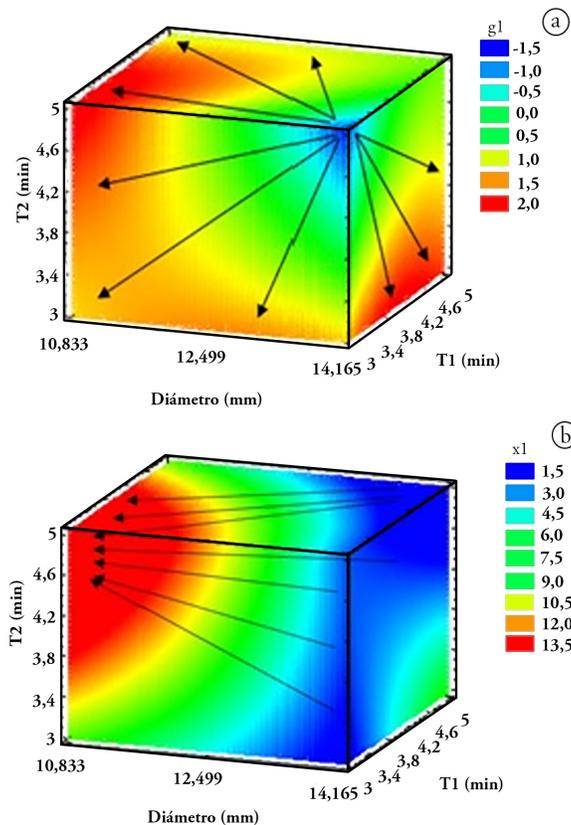


Figura 1. Respuesta en el proceso de impregnación de vacío (IV) de los cogollos frescos de palma de iraca (CFPI). a) g_1 ; b) X_1 .

Dentro de los criterios favorables para la aplicación de la técnica de IV en una matriz porosa, se desea que los niveles de g_1 y g sean lo menor posible; sin embargo, para este caso al ser g_1 positivo y el valor de X_1 positivo, implica que la deformación volumétrica favorece la transferencia de masa hacia el interior en la etapa de vacío; por lo que, un criterio óptimo podría ser un valor intermedio, que contribuya un ingreso y deformación intermedio.

Bajo este contexto, el gráfico de volumen de respuesta identifica la zona verde, donde $g_1 = 0,1535$; además, se observa que la dirección de las flechas identifica el comportamiento que experimenta la estructura, yendo desde una contracción hacia una expansión volumétrica. Por otro lado, el gráfico de volumen de respuesta identifica la zona roja, como es espacio operativo más favorable para X_1 , donde esta se maximiza y, al mismo tiempo, contribuye a una mayor transferencia de masa del líquido de impregnación. Esta condición operativa a menores diámetros del CFPI, T_2 mayores a 3,4 min y T_1 entre 3,0 y 4,6 min. Este comportamiento afianza lo mencionado inicialmente; el impacto de la fuerza hacia el exterior que experimenta el CFPI durante la etapa de vacío, produce un ablandamiento considerable e incremento de la porosidad de estructura, que termina expandiendo la matriz, principalmente, cuando el sistema opera a T_2 altos, debido a que, en esta etapa, la presión positiva del líquido de impregnación contribuye a la mayor expansión y el mayor ingreso del líquido en la estructura.

Los valores medios de g fluctuaron entre 4,5 y 1 %, lo que denota un incremento de la expansión volumétrica del CFPI, lo cual, se atribuye al cambio de presión en la etapa a la P_2 , que acelera el líquido hacia el interior y al acoplamiento del MHD y los fenómenos de deformación-relajación (FDR) que ocurren en un estado de equilibrio al final del proceso, como consecuencia del estrés mecánico ante el ΔP , en el proceso IV (Fito et al. 1996). Los valores medios de X fluctuaron entre 8,0 y 17,8 %, lo cual, indica que la estructura del CFPI es adecuada para la incorporación del líquido isotónico, causado exclusivamente por el MHD, impuesto por los cambios de presión, que induce a los procesos de transferencia de masa en ambas etapas. Se aclara que este argumento se soporta, debido a que la solución isotónica garantiza que no haya otros mecanismos de transferencia de masa, por ejemplo, aquellos debido a la diferencia del potencial químico del agua entre los CFPI y el líquido de impregnación.

La figura 2 presenta los gráficos de volumen de respuesta de g y X , donde se identifica un efecto importante de T_2 , sin llegar a estar bien definido su comportamiento, sino que existe una dependencia con respecto con diámetro y T_1 , lo cual, se refleja por la interacción negativa diámetro- T_2 y por interacción positiva T_1 - T_2 . La mayor expansión del CFPI ($> g$) se potencia cuando la interacción diámetro- T_2 ocurre con mayor diámetro y menor T_2 ; mientras que, con la interacción T_1 - T_2 ocurre a menores T_1 y T_2 . Esta complejidad en la dinámica de la IV sobre los cambios volumétricos se explica por diversos factores, que incluyen la misma naturaleza porosa y firmeza de la estructura, el tamaño y la distribución de los poros al interior de la estructura, el tamaño de la muestra y la velocidad de ingreso del líquido de impregnación (Duarte-Correa et al. 2020).

En el contexto de un producto impregnado, una g mínima garantiza un menor stress mecánico y una estructura similar al producto original, lo que contribuye a una mayor retención del líquido incorporado en su interior; sin embargo, para el CFPI, al presentar g y X_1 valores positivos, resulta favorable a la transferencia de masa hacia su interior, por lo que un criterio óptimo para esta matriz resulta un valor intermedio (2,73 %). Bajo esta circunstancia, el gráfico de volumen de respuesta identifica la zona de color verde cuando g es 2,73 %, ubicándose, principalmente, en rangos de diámetros entre 10,8 - 12,5 mm, T_1 entre 3 - 4 min y en todo rango de T_2 .

La X , a pesar de no presentar diferencias estadísticas, es uno de los parámetros más importantes en los procesos IV, ya que está directamente relacionado con el líquido de impregnación que se incorpora al interior de la estructura; en la figura 2, se ilustra el comportamiento general de la X , donde se observa que una mayor X se alcanza cuando el sistema opera con diámetros de CFPI bajos, en todo el rango de T_1 y T_2 .

Finalmente, los resultados de la E_e fueron coherentes con los resultados encontrado en la X , fluctuando los valores medios entre 6,7 y 17,4%, lo cual, garantiza la eficacia del proceso IV, ya que representa el porcentaje volumétrico disponible para el proceso IV (Kręcisz et al. 2023). En este contexto, la figura 3 presenta los gráficos de superficie y volumen de respuesta de la E_e del CFPI, durante el proceso IV. Los efectos individuales de T_1 y T_2 son dependientes, que hace que la interacción lineal observada de T_1 - T_2 fue negativa, donde los mayores valores se observan a T_1 bajos y T_2 altos y a T_1 altos y T_2 bajos. El efecto de las tres variables independiente se observa mejor en el gráfico de volumen de respuesta, similar al comportamiento de X , lo cual, revalida los mayores valores de E_e , cuando el sistema opera con diámetros bajos y en todo el rango de T_1 y T_2 .

Optimización del proceso IV. La optimización experimental de múltiples respuestas del proceso IV del CFPI se realizó con base en los resultados estadísticos y fijando ciertos criterios que favorezcan los atributos de calidad del cogollo impregnado. La tabla 2 resume las condiciones fijadas de las variables dependientes, bajo las cuales, se realizó la optimización; además, los pesos y el impacto dado a cada variable dependiente, donde el valor de deseabilidad fue del 89,6 %, donde se buscó maximizar X , X_1 y E_e , con el fin de aumentar la cantidad de líquido impregnado y retenido. La aplicación del Software Statgraphics Centurión XV I.I generó, como condiciones óptimas del proceso de impregnación del CFPI, con solución isotónica de NaCl: diámetro 10,83, T_1 : 4,47 min y T_2 : 3,97 min, donde los modelos matemáticos definieron los valores teóricos. Adicionalmente, los valores teóricos obtenidos a las condiciones óptimas fueron: g_1 0,45 %, X_1 11,46 %, g 2,57 %, X 17,39 % y E_e 17,04 %. Los valores experimentales reales bajo las condiciones óptimas fueron: g_1 0,51 %, X_1 17,03 %, g 1,40 %, X 19,15 % y E_e 20,40 %, siendo estos valores similares a los teóricos.

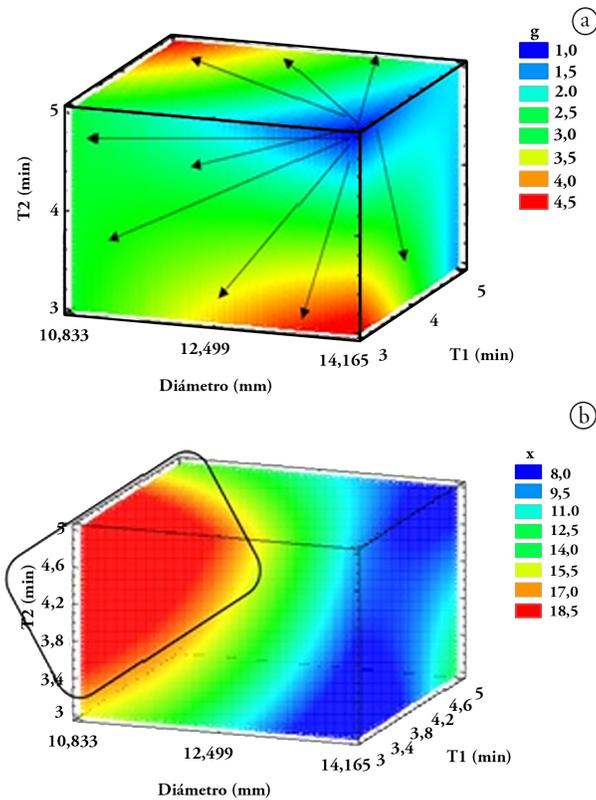


Figura 2. Respuesta en el proceso de impregnación de vacío (IV) de los cogollos frescos de palma de iraca (CFPI). a) g; b) X.

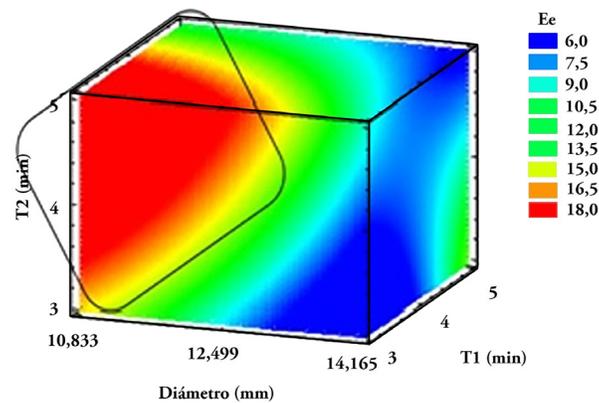


Figura 3. Respuesta de la Ee en el proceso de impregnación de vacío IV de los cogollos frescos de palma de iraca CFPI.

Tabla 2. Optimización experimental del proceso de impregnación de cogollos frescos de palma de iraca CFPI.

<i>Variable dependiente</i>	Criterio	Impacto	Peso	Valor teórico	Valor experimental
g _i (%)	0,15	4,0	1,0	0,45	0,51
X _i (%)	Maximizar	4,0	1,0	11,46	17,03
G (%)	2,73	4,0	1,0	2,57	1,39
X (%)	Maximizar	5,0	1,5	17,39	19,14
Ee (%)	Maximizar	5,0	1,5	17,04	20,40

La tabla 3 presenta los coeficientes de regresión estimados del modelo polinómico cuadrático y sus respectivos R^2 . Se observa que los valores R^2 , para la mayoría de las variables, fueron relativamente altos, siendo los valores mostrados superiores a 83,3 %, mientras que, la prueba de falta de ajuste permitió determinar que el modelo

muestra una aceptabilidad, para predecir la variación de estas. Además de lo anterior, los resultados no mostraron significancia estadística relevante ($p > 0,05$) en las variables dependientes, lo que indica que el modelo es adecuado para describir el comportamiento de los datos experimentales.

Tabla 3. Coeficientes de los modelos de regresión de las variables dependientes del proceso de impregnación de CFPI.

Fuente	g1	X1	g	X	Ee
Constante	-12,09	-63,43	-20,58	-38,33	-22,04
A: Diámetro	2,21	1,82	3,51	5,03	2,06
B: T1	-4,02	5,75	-1,76	-4,37	-3,58
C: T2	4,16	34,18	2,92	24,10	24,86
AA	-0,08	-0,12	-0,03	-0,40	-0,44
AB	0,50	0,94	-0,17	0,96	1,36
AC	-0,54	-1,37	-0,55	-0,43	0,06
BB	-0,49	-0,79	-0,07	0,43	0,50
BC	0,37	-3,05	1,02	-2,87	-4,41
CC	0,13	-0,55	-0,01	-0,83	-0,92
R^2	93,2	90,1	97,7	83,70	83,30
Falta de ajuste (p-value)	0,67	0,79	0,59	0,27	0,27

Los resultados permiten concluir que la aplicación de la ingeniería de matrices utilizando la técnica de IV identificó al CFPI como una estructura alimentaria adecuada y efectivas, para permitir la incorporación de diversos componentes en los espacios intercelulares, contribuyendo a la generación de valor de la agrocadena de la Palma de Iraca, como producto mínimamente procesado. Por otro lado, la dinámica de la IV del CFPI está influenciada por las variables independientes seleccionadas (diámetro, T_1 , T_2) y por sus interacciones lineales. Se resalta, principalmente, que el proceso de IV del CFPI comporta una expansión volumétrica durante todo el proceso, la cual, finalmente, contribuye al proceso de transferencia de masa del líquido isotónico al interior de la estructura. La microestructura porosa del CFPI es muy compatible con el proceso de IV, permitiendo valores altos de X y Ee. Los resultados alcanzados son 100% satisfactorios para la proyección futura de incorporación de los componentes activos de interés seleccionados, para la continuación de la investigación. Por otro lado, se provee un buen resultado de la integración del proceso IV y liofilización, lo que fortalecerá, aún más, la generación de valor con productos innovadores que ofrecen potenciales beneficios a los consumidores.

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.

REFERENCIAS

- 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>
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC. 1990. Official methods of analysis. 15th edition. Association of Official Analytical Chemists. Association of Official Analytical Chemist (Washington). 1298p.
- AYKIN-DINÇER, E. 2021. Application of ultrasound-assisted vacuum impregnation for improving the diffusion of salt in beef cubes. Meat Science. 176:108469. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2021.108469>
- BECERRA, J.; ESCOBAR, R.; SERNA, Y. 2004. Estudio del cultivo bajo cubierta de cuatro especies vegetales de la huerta Chocoana en el municipio de Quibdó. Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó. 21:24-28.
- CHIRALT, A.; FITO, P.; BARAT, J.M.; ANDRÉS, A.; GONZÁLEZ MARTÍNEZ, C.; ESCRICHE, I.; CAMACHO, M.M. 2001.

- Use of vacuum impregnation in food salting process. *Journal Food Engineering*. 49:129-135. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00219-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00219-3)
6. CORTEZ-LATORRE, J.D.; FAICÁN, M.; PIROVANI, M.; PIAGENTINI, A. 2021. Improving fresh-cut apple quality and healthy potential-related attributes through mild vacuum impregnation process. *Journal of Food Processing and Preservation*. 45(12):e15995. <https://doi.org/10.1111/jfpp.15995>
 7. DEROSI, A.; DE PILLI, T.; SEVERINI, C. 2012. The Application of vacuum impregnation techniques in food industry. En: Valdez, B. *Scientific, Health and Social Aspects of the Food Industry*. IntechOpen. p.26-56. <https://doi.org/10.5772/31435>
 8. DEROSI, 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 and Emerging Technologies*. 70:102677. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102677>
 9. DUARTE-CORREA, Y.; GRANDA-RESTREPO, D.; CORTÉS, M.; VEGA-CASTRO, O. 2020. Potato snacks added with active components: effects of the vacuum impregnation and drying processes. *Journal of Food Science and Technology*. 57:1523-1534. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04188-5>
 10. FITO, P.; PASTOR, R. 1994. Non-diffusional mechanism occurring during vacuum osmotic dehydration (VOD). *Journal of Food Engineering*. 21: 513-519. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90070-1](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90070-1)
 11. FITO, P. 1994. Modelling of vacuum osmotic dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*. 22:313-328. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)90037-X)
 12. 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*. 27:229-240. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00005-4](https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00005-4)
 13. GONZALEZ, CH.; FUENTES, C.; ANDRÉS, A.; CHIRALT, A.; FITO, P. 1999. Effectiveness of vacuum impregnation brining of Manchego-type curd. *International Dairy Journal*. 9:143-148.
 14. GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, C.; CHAFER, M.; FITO, P.; CHIRALT, A. 2002. Development of salt profiles on Manchego type cheese during brining. Influence of vacuum pressure. *Journal of Food Engineering*, 53:67-63. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(01\)00141-8](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(01)00141-8)
 15. JIMÉNEZ-MÉNDEZ, G.; GAMARRA-PÉREZ, A.; TRONCOSO-PALACIO, A. 2023. Aplicando control calidad en la manufactura de manteles individuales de palma de iraca. *Boletín de Innovación, Logística y Operaciones*. 5(1):28-39. <https://doi.org/10.17981/bilo.5.1.2023.03>
 16. KRĘCISZ, M.; KOLNIAK-OSTEK, J.; ŁYCZKO, J.; STĘPIEŃ, B. 2023. Evaluation of bioactive compounds, volatile compounds, drying process kinetics and selected physical properties of vacuum impregnation celery dried by different methods. *Food Chemistry*. 413:135490. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135490>
 17. LE, D.; KONSUE, N. 2021. Mass transfer behavior during osmotic dehydration and vacuum impregnation of “phulae” pineapple and the effects on dried fruit quality. *Current Research in Nutrition and Food Science*. 9(1):308–319. <https://doi.org/10.12944/CRNFSJ.9.1.29>
 18. LUO, W.; TAPPI, S.; PATRIGNANI, F.; ROMANI, S.; LANCIOTTI, R.; ROCCULI, P. 2019. Essential rosemary oil enrichment of minimally processed potatoes by vacuum-impregnation. *Journal of Food Science and Technology*. 56(10):4404–4416. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03935-y>
 19. MARCHETTI, M.D.; TOMAC, A.; YEANNES, M.I.; GARCIA LOREDO, A.B. 2022. Comprehensive analysis of vacuum application in desalting lean white fish to develop a highly acceptable ready-to-use product. *LWT*. 163:113527. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113527>
 20. MARTÍNEZ NAVARRETE, N.; ANDRÉS GRAU, A.; CHIRALT BOIX, A.; MAUPOEY, P.F. 1998. *Termodinámica y cinética de sistemas alimento y entorno*. Universidad Politécnica de Valencia. 374p.
 21. MIERZWA, D.; SZADZIŃSKA, J.; GAPIŃSKI, B.; RADZIEJEWSKA-KUBZDELA, E.; BIEGAŃSKA-MARECIK, R. 2022. Assessment of ultrasound-assisted vacuum impregnation as a method for modifying cranberries' quality. *Ultrasonics Sonochemistry*. 89:106117. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106117>
 22. MIERZWA, D.; SZADZIŃSKA, J.; RADZIEJEWSKA-KUBZDELA, E.; LENARTOWICZ, T. 2023. Effect of ultrasound on mass transfer during vacuum impregnation of low-porous food materials on the example of potato (*Solanum Tuberosum* L.). *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 188:109375. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109375>

23. NERI, L.; SANTARELLI, V.; DI MATTIA, C.D.; SACCHETTI, G.; FAIETA, M.; MASTROCOLA, D.; PITTIA, P. 2019. Effect of dipping and vacuum impregnation pretreatments on the quality of frozen apples: A comparative study on organic and conventional fruits. *Journal of Food Science*. 84(4):798-806. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14489>
24. OSSA MONTOYA, V.; GIL, M.; CORTÉS, M. 2023. Impregnación al vacío y sus parámetros operativos: una revisión. *Tecnológicas*. 26(56):e2605. <https://doi.org/10.22430/22565337.2605>
25. PANAYAMPADAN, A.S.; ALAM, M.S.; ASLAM, R.; KAUR, J. 2022. Vacuum impregnation process and its potential in modifying sensory, physicochemical and nutritive characteristics of food products. *Food Engineering Reviews*. 14(2):229-256. <https://doi.org/10.1007/s12393-022-09312-4>
26. PANDISELVAM, R.; TAK, Y.; OLUM, E.; SUJAYASREE, O.J.; TEKĞÜL, Y.; ÇALIŞKAN KOÇ, G.; KAUR, M.; NAYI, P.; KOTHAKOTA, A.; KUMAR, M. 2022. Advanced osmotic dehydration techniques combined with emerging drying methods for sustainable food production: Impact on bioactive components, texture, color, and sensory properties of food. *Journal of Texture Studies*. 53(6):737-762. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12643>
27. PAVIA, M.; TRUJILLO, A.J.; SENDRA, E.; GUAMIS, B.; FERRAGUT, V. 2000. Free fatty acid content of Manchego-type cheese salted by brine vacuum impregnation. *International Dairy Journal* 10:563-568. [https://doi.org/10.1016/S0958-6946\(00\)00083-2](https://doi.org/10.1016/S0958-6946(00)00083-2)
28. RAMÍREZ, N.; VEGA-CASTRO, O.; SIMPSON, R.; RAMIREZ, C.; NUÑEZ, H. 2021. Effect of pulsed vacuum and laser microperforations on the potential acceleration of chicken meat marination. *Journal of Food Process Engineering*. 44(3):e13627. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13627>
29. REZENDE ABRAHÃO, F.; GOMES CORRÊA, J.L. 2021. Osmotic dehydration: More than water loss and solid gain. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 63(17). <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1983764>
30. 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>
31. SANTARELLI, V.; NERI, L.; MOSCETTI, R.; DI MATTIA, C.D.; SACCHETTI, G.; MASSANTINI, R.; PITTIA, P. 2021. Combined use of blanching and vacuum impregnation with trehalose and green tea extract as pre-treatment to improve the quality and stability of frozen carrots. *Food and Bioprocess Technology*. 14(7):1326-1340. <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02637-8>
32. THAKUR, M.; MODI, V.K. 2020. Emerging technologies in food science. Focus on the developing world. Springer Singapore. 287. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-2556-8>
33. TOMAC, A.; RODRÍGUEZ MALLO, S.; PÉREZ, S.; GARCÍA LOREDO, A.; YEANNES, M.I. 2020. Salado húmedo de filetes de merluza mediante impregnación al vacío. *La Industria Cárnica Latinoamericana*. 215:56-61.