

Mathematical description of the viscoelastic properties of discarded blueberries pretreated with osmotic dehydration and mechanical modification

Maria Namoc¹; Karla Ramirez²; Alberto Claudio Miano²; Meliza Lindsay Rojas²*

¹Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Privada del Norte, Perú, namocme0705@gmail.com

²Centro de Investigación Avanzada en Agroingeniería (CIAA), Universidad Privada del Norte (UPN), Perú, karla.ramirez@upn.edu.pe, alberto.miano@upn.edu.pe, meliza.rojas@upn.edu.pe

*Corresponding author

Abstract– This study evaluated the impact of osmotic dehydration (OD) and cutting pretreatments on the viscoelastic properties of discarded blueberries using three mathematical models: Maxwell, Peleg, and Guo-Campanella. The OD process was conducted in a 50 °Brix sucrose solution with a partial longitudinal cut. Viscoelastic properties were assessed through stress-relaxation curves obtained from compression tests. The findings indicated that both cutting and OD significantly reduced the initial compression force. All three models accurately described the experimental data ($R^2 > 0.95$), with the Maxwell model providing the best fit, followed by Guo-Campanella, and then Peleg. The Maxwell model effectively described the viscoelastic behavior by associating elastic elements with the solid part and viscous elements with the fluid part. It showed that the blueberry skin, being more resistant, exhibited purely elastic behavior, while internal structures combined both elastic and viscous elements. The Peleg model indicated that OD and cutting reduced the fruit's firmness. The Guo-Campanella model demonstrated a decrease in elastic modulus primarily due to OD. When blueberries were cut, the endocarp structure was most affected due to its empty spaces. OD drastically decreased the elastic and viscous properties by causing water loss and reduced turgor in the cells, impacting their mechanical properties. These findings should be considered to determine the potential positive or negative effects on subsequent processes, such as drying or overall product quality.

Keywords– Osmotic dehydration; Viscoelastic properties; Mathematical models; Blueberries; Compression test

Descripción matemática de las propiedades viscoelásticas de arándano de descarte pretratado con deshidratación osmótica y modificación mecánica

Maria Namoc¹; Karla Ramirez² , Alberto Claudio Miano ; Meliza Lindsay Rojas *

¹Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Privada del Norte, Perú, namocme0705@gmail.com

²Centro de Investigación Avanzada en Agroingeniería (CIAA), Universidad Privada del Norte (UPN), Perú, karla.ramirez@upn.edu.pe, alberto.miano@upn.edu.pe, meliza.rojas@upn.edu.pe

*Corresponding author

Resumen– Este estudio evaluó el impacto de los pretratamientos de deshidratación osmótica (DO) y corte sobre las propiedades viscoelásticas de los arándanos descartados utilizando tres modelos matemáticos: Maxwell, Peleg y Guo-Campanella. El proceso de DO se realizó en una solución de sacarosa a 50 °Brix con un corte longitudinal parcial. Las propiedades viscoelásticas se evaluaron a través de curvas de relajación de tensión obtenidas de pruebas de compresión. Los hallazgos indicaron que tanto el corte como la DO redujeron significativamente la fuerza de compresión inicial. Los tres modelos describieron con precisión los datos experimentales ($R^2 > 0,95$), siendo el modelo de Maxwell el que mejor se ajustó, seguido por Guo-Campanella y luego Peleg.

El modelo de Maxwell describió eficazmente el comportamiento viscoelástico al asociar elementos elásticos con la parte sólida y elementos viscosos con la parte fluida. Mostró que la piel del arándano, al ser más resistente, exhibía un comportamiento puramente elástico, mientras que las estructuras internas combinaban elementos elásticos y viscosos. El modelo de Peleg indicó que la DO y el corte reducían la firmeza de la fruta. El modelo de Guo-Campanella demostró una disminución en el módulo elástico principalmente debido a la DO.

Cuando los arándanos eran cortados, la estructura del endocarpio era la más afectada debido a sus espacios vacíos. La DO disminuyó drásticamente las propiedades elásticas y viscosas al causar la pérdida de agua y reducir el turgor en las células, afectando sus propiedades mecánicas. Estos hallazgos deben considerarse para determinar los posibles efectos positivos o negativos en procesos posteriores, como el secado o la calidad general del producto.

Palabras clave– Deshidratación osmótica; Propiedades viscoelásticas; Modelos matemáticos; Arándanos; Ensayo de compresión

I. INTRODUCCIÓN

Los arándanos (*Vaccinium corymbosum* L.) son bien valorados por su alto contenido de compuestos bioactivos, vitaminas, minerales y fibra dietética [1, 2]. Este perfil nutricional ha clasificado a los arándanos como un “superalimento”, incrementando su popularidad y posicionándolos como un producto de interés en la industria alimentaria y de exportación [3, 4]. En Perú, por ejemplo, se producen aproximadamente 146 000 toneladas anuales, de las cuales cerca del 80% se exportan, mientras que el 20% restante se descarta debido a daños mecánicos, sobre maduración y defectos durante el procesamiento y empaque [5]. Este descarte implica la pérdida de importantes propiedades nutricionales y funcionales,

convirtiendo su reutilización en un tema esencial para la sostenibilidad económica e industrial.

Para abordar este problema y promover prácticas sostenibles, los investigadores han explorado diversos métodos para valorizar los arándanos de descarte. Un enfoque común es el secado, el cuál puede extender la vida útil de las frutas. Sin embargo, los métodos de secado tradicionales pueden ser intensivos en consumo de energía y demandantes de mucho tiempo, especialmente para frutas con una capa cerosa como los arándanos [6, 7]. Para superar estas limitaciones, se han propuesto pretratamientos que modifican la estructura y composición previamente al secado, los más estudiados a la fecha son pretratamientos de perforación, corte y la deshidratación osmótica [7, 8]. Estos pretratamientos reducen la resistencia interna al secado, mejorando la transferencia de masa, reduciendo el tiempo de secado y mejorando la calidad del producto.

Sin embargo, un aspecto poco explorado es que estos pretratamientos pueden afectar la estructura de la fruta en diferentes niveles, llegando incluso a ejercer un efecto negativo en los procesos posteriores. Una manera de evaluar el impacto en la estructura y sus elementos es a través del análisis de sus propiedades viscoelásticas. Estas reflejan la capacidad del material de comportarse tanto como un sólido elástico, capaz de recuperar su forma tras la deformación, y como un líquido viscoso, que fluye bajo tensión [9, 10]. En el caso de los arándanos, las pruebas mecánicas han demostrado este comportamiento viscoelástico bajo carga mecánica, evaluando sus propiedades principalmente en función de la fuerza, la deformación y el tiempo [11, 12].

Para comprender y predecir este comportamiento, se han utilizado modelos matemáticos, siendo el modelo de Maxwell uno de los más conocidos y ampliamente aplicados. Este modelo describe la relación entre el esfuerzo de compresión, deformación y tiempo, proporcionando un marco fundamental para analizar y caracterizar las respuestas viscoelásticas de este tipo de materiales [9, 13]. Sin embargo, existen otros modelos los cuales podrían también ser útiles en la explicación de los cambios viscoelásticos y que deben ser validados comparando sus parámetros con el modelo fenomenológico de Maxwell. En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de los pretratamientos de deshidratación osmótica y corte en las propiedades

viscoelásticas de los arándanos de descarte mediante diferentes modelos matemáticos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Materia prima

Se utilizó arándano (*Vaccinium corymbosum* L. var. Biloxi) de descarte (que no cumple con los requisitos de exportación, pero que es apto para consumo) obtenido de un mercado local (Trujillo, Perú). La materia prima utilizada mostró coloración uniforme, diámetro de 11 – 16 mm, y se encontraba libre de magulladuras y de contaminación por microorganismos.

B. Pretratamientos

Se realizaron dos tipos de pretratamientos según lo representado en la Figura 1 y lo descrito a continuación.

1) *Modificación mecánica*: Los arándanos fueron cortados longitudinalmente iniciando el corte en la parte central del cáliz de la baya y sin llegar a separar las mitades. Como control se consideró a los arándanos enteros.

2) *Deshidratación osmótica*: Se preparó la solución de sacarosa a 50 °Brix, se realizó la verificación de los °Brix requeridos haciendo uso de un refractómetro. El descarte de arándano sin y con modificación mecánica fue sumergido en la solución osmótica durante 6 horas a temperatura de ambiente, utilizándose un ratio sólido-líquido de 1:10 (20gr en 200 mL de solución osmótica).

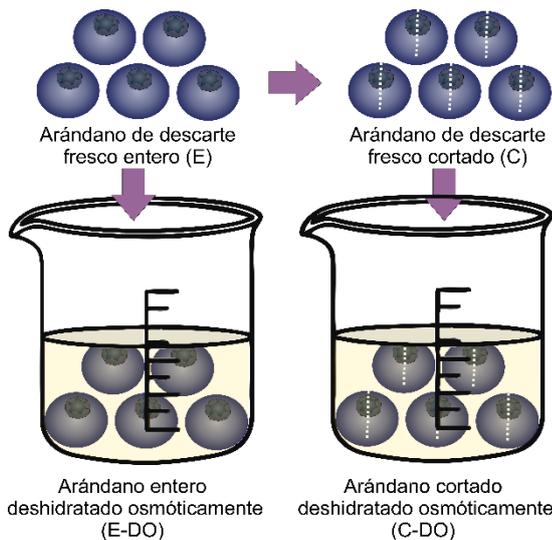


Fig. 1 Representación esquemática del procedimiento experimental llevado a cabo durante los pretratamientos.

C. Propiedades viscoelásticas

Para describir las propiedades viscoelásticas se utilizó la prueba de esfuerzo-relajación según lo descrito por Rojas and Augusto [14], Rao and Steffe [15]. Se evaluó los cambios viscoelásticos en las bayas de arándano al inicio y después de los pretratamientos. El ensayo consistió en la compresión lateral de la baya fijada a la base de la plataforma del texturómetro utilizando cinta doble faz, a una velocidad de 0.2 mm/s hasta alcanzar una distancia de compresión de 1 mm (curva de esfuerzo-deformación). La distancia de compresión fue seleccionada considerando que

el análisis se lleve a cabo en el rango viscoelástico lineal. La deformación alcanzada (ϵ) correspondiente a la distancia comprimida en cada baya se mantuvo constante durante 30 s y se registró el esfuerzo de compresión a lo largo del tiempo (curva de esfuerzo-relajación) (Figura 2). El ensayo de compresión se realizó utilizando un analizador de textura (TA.XT Plus, Stable Micro Systems Ltd., Surrey, Reino Unido) con una celda de carga de 30 kg-f y un cilindro de aluminio de 35 mm (P/35R).

D. Modelamiento matemático

Para describir las propiedades viscoelásticas se utilizaron tres modelos: el modelo generalizado de Maxwell [15, 16], el modelo de Peleg [17] y el modelo Guo-Campanella [18]. Para el modelo de Maxwell (ME), cada elemento está compuesto por un resorte de Hooke (que representa el comportamiento sólido y elástico) y un amortiguador newtoniano (que representa el comportamiento fluido y viscoso) organizados en serie. El modelo generalizado de Maxwell consta de diferente número de elementos Maxwell organizados en paralelo con un resorte Hookeano aislado, el cual contribuye con la elasticidad residual (ξ_e). La caída del esfuerzo de compresión a lo largo del tiempo ($\sigma(t)$) durante la prueba de esfuerzo-relajación se puede describir como una función de la deformación constante (ϵ , relación entre la distancia de compresión y la altura total del arándano), la elasticidad residual (ξ_e), el tiempo de relajación (τ_i) y módulo elástico (ξ_i) (1) de cada elemento de Maxwell. A partir del tiempo de relajación y el módulo elástico se obtuvo el módulo viscoso (η_i) (2). Con la finalidad de una mejor interpretación, en el presente estudio se consideró el uso de 2 elementos de Maxwell organizados en paralelo con un resorte Hookeano.

$$\sigma(t) = \epsilon \cdot (\xi_e + \xi_1 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + \xi_2 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) + \dots + \xi_i \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right)) \quad (1)$$

$$\eta_i = \tau_i \cdot \xi_i \quad (2)$$

La ecuación de Peleg (PE) (3) es un modelo empírico que cuenta con dos parámetros con cierto significado físico para explicar las propiedades mecánicas del producto en una prueba de esfuerzo-relajación. La inversa del parámetro k_1 representa la velocidad de la caída inicial de la curva de relajación y el parámetro k_2 está relacionado con el grado de “solidez” de la muestra, cuyos valores pueden ser desde 1 (“fluido puro”) hasta el infinito [17]. En sí, mientras más alto es el valor, la muestra tendría un comportamiento cada vez más de sólido ideal. Además, la ecuación considera el esfuerzo al tiempo cero (σ_0).

$$\frac{\sigma_0 - \sigma(t)}{\sigma_0} = \frac{t}{k_1 + k_2 \cdot t} \quad (3)$$

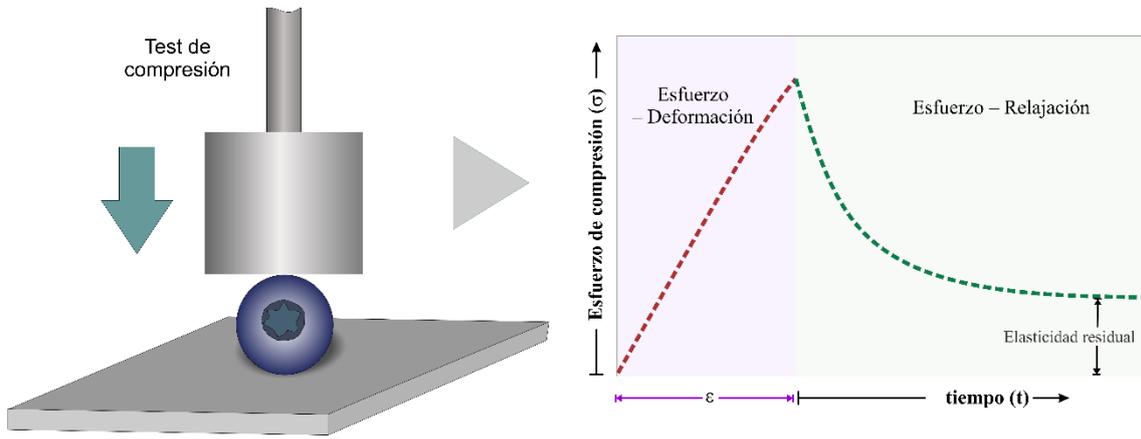


Fig. 2 Representación esquemática del ensayo de compresión en las muestras de arándano y la curva de *esfuerzo de compresión vs tiempo* generada.

Por otro lado, la ecuación de Guo-Campanella (GC) (4) es un modelo proveniente del cálculo fraccional. El modelo tiene dos parámetros: k_G que es el módulo viscoelástico y α que representa el orden fraccional cuyos valores están entre cero y uno. Para α , un valor cercano a 0 indicaría que el material tiende a comportarse como sólido ideal, mientras que un valor cercano a 1, indicaría que el material se comportaría como un fluido ideal. Además, en (4), ε representa la deformación considerada para el análisis y Γ representa la función gamma.

$$\sigma(t) = k_G \frac{\varepsilon}{\Gamma(1-\alpha)} t^{-\alpha} \quad (4)$$

E. Análisis estadístico

Para el ajuste de los datos a los modelos, los parámetros de cada modelo fueron ajustados interactivamente para minimizar el error cuadrático (SSE – (5)). Para lo cual se empleó el algoritmo de reducción de gradiente generalizado implementado en la herramienta “Solver” de Microsoft Excel (Microsoft, USA).

Para evaluar la eficiencia de ajuste de los modelos, algunos parámetros estadísticos fueron empleados como: el coeficiente de determinación (R^2), valores de desviación cuadrático medio (RMSD) (6) y valores de desviación cuadrático medio normalizado (NRMSD) (7). Además, mediante regresión lineal (8) entre los valores experimentales y predichos por el modelo, se obtuvieron los parámetros a y b (pendiente e intercepto) en donde valores de a cercanos a 1 y valores de b cercanos a 0 indican un mejor ajuste de los datos.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (\sigma_{predicho} - \sigma_{experimental})_i^2 \quad (5)$$

$$RMSD = \sqrt{\frac{SSE}{n}} \quad (6)$$

$$NRMSD = 100 \frac{RMSD}{(\sigma_{experimental})_{\max} - (\sigma_{experimental})_{\min}} \quad (7)$$

$$\sigma_{predicho} = a \cdot \sigma_{experimental} + b \quad \dots\dots\dots (8)$$

Por otro lado, para evaluar la diferencia en las propiedades mecánicas de los arándanos causados por los

tratamientos (corte y deshidratación osmótica), se realizó un análisis de varianza (ANOVA) a los parámetros de los modelos. Este análisis se realizó con un nivel de confianza del 95%. Si existía diferencia significativa entre los tratamientos, se realizó la prueba de Tukey para verificar diferencia significativa ($p < 0.05$) entre pares de tratamientos. Para este análisis se usó el software Statistica 7.0.

III. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En la Figura 3 se muestran las curvas de esfuerzo-relajación de los arándanos cortados y deshidratados osmóticamente. En esta figura se pueden apreciar el ajuste de los 3 modelos matemáticos evaluados en el presente trabajo, cuyos parámetros y bondad de ajuste se muestran en la Tabla I.

Gráficamente se puede observar que tanto el corte (C) como la deshidratación osmótica (DO) disminuyeron la fuerza de compresión inicial. Por ejemplo, los arándanos enteros (E) tuvieron una fuerza de compresión alrededor de 8 y 10 kPa, los cortados (C) entre 6 y 8 kPa, los E-DO entre 5 y 7 kPa, y los C-DO entre 3 y 4 kPa. Esto evidencia el cambio estructural que tuvieron los arándanos al ser procesados y que tuvieron como consecuencia cambios en sus propiedades mecánicas.

En la Tabla I se puede verificar que los tres modelos usados para describir la curva de esfuerzo-relajación de los arándanos, enteros, cortados y deshidratados osmóticamente, tuvieron un muy buen ajuste, al tener un R^2 mayor a 0.95. Sin embargo, el modelo generalizado de Maxwell presentó el mejor ajuste, seguido del modelo de Guo Campanella y finalmente el modelo de Peleg, evidenciado por el valor del error cuadrático normalizado (NRMSD). Esto sucede comúnmente en modelos con mayor número de parámetros, los cuales ayudan en el ajuste de los datos. Para este caso, el modelo de Maxwell presentó 5 parámetros, comparados con los otros dos modelos que cuentan con solo 2. Sin embargo, cabe recordar, que mientras mayor número de parámetros, mayor es la dificultad para interpretarlos.

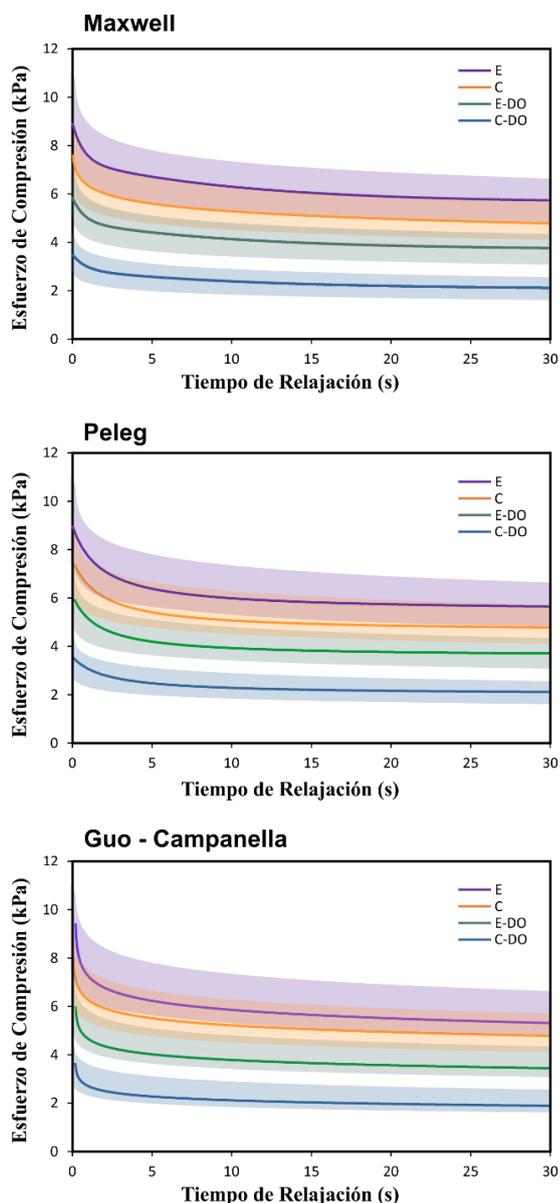


Fig. 3 Curvas de esfuerzo-relajación de arándanos cortados y deshidratados osmóticamente. Las líneas continuas representan el ajuste del modelo matemático utilizado y las zonas sombreadas representan los intervalos de confianza (95% de confianza) de los datos experimentales (n=20).

El arándano tiene una estructura biológica formada por tejidos [19] que cuentan con estructura sólida compuesta por biomoléculas como carbohidratos, lípidos y proteínas, y fluidos (agua y gases como aire atrapado), por lo que cuenta con propiedades mecánicas de ambos sólido y fluido. Los parámetros de los modelos nos pueden dar información de que tanto cambia la estructura del fruto del arándano en diferentes condiciones.

Respecto al modelo generalizado de Maxwell, este nos permite describir el comportamiento viscoelástico de los arándanos mediante elementos elásticos y viscosos, relacionando los elementos elásticos a la parte sólida del arándano y los elementos viscosos a la parte fluida del arándano, similar a algunos trabajos con melón [20] y calabaza [14].

Siguiendo este procedimiento, se podría considerar los elementos elásticos ξ_e , ξ_1 y ξ_2 como las estructuras sólidas

del arándano de acuerdo con su morfología y a los elementos viscosos η_1 y η_2 como la composición fluida del arándano (Figura 4). Donde, ξ_e podría representar la elasticidad ejercida por la cáscara, ξ_1 podría representar la elasticidad ejercida por las células del mesocarpio (pulpa), y ξ_2 la elasticidad ejercida por el endocarpio (células y cavidades donde se encuentran las semillas). Los elementos elásticos 1 y 2 junto con su respectivo elemento viscoso 1 y 2 están formando cuerpos de Maxwell (Rao & Steffe, 1992), por lo que los componentes η_1 y η_2 representarían el fluido dentro de las células del mesocarpio (fluido intercelular o citoplasma) y el fluido en las cavidades donde se encuentran las semillas (fluido intercelular y aire), respectivamente (Figura 4). A partir de correlacionar los elementos de Maxwell con la estructura y composición del arándano, es posible interpretar de la Tabla I.

En primer lugar, para el arándano entero, el valor del elemento elástico del término independiente ξ_e tiene un valor mayor a los otros, ya que la cáscara del arándano es mucho más resistente que las células del endocarpio. Por otro lado, los elementos elásticos 1 y 2 del arándano entero tienen valores similares por tener la misma estructura que lo conforman (paredes y membranas celulares), pero con un valor ligeramente menor para el endocarpio por tener más espacios vacíos. Respecto a los elementos viscosos, se sugiere que el elemento viscoso 1 ejerce una resistencia mayor que el elemento viscoso 2, debido a que la viscosidad del citoplasma es mayor que la del agua y aire atrapado en los espacios del endocarpio. Con esta información es posible evaluar el efecto de los tratamientos en los cambios de viscoelasticidad del fruto.

Cuando se realiza un corte al arándano, el único elemento que varía significativamente ($p < 0.5$) es el correspondiente al endocarpio (ξ_2 y η_2). Esto podría deberse a que es la estructura más débil del arándano por la cantidad de espacios vacíos que contiene. Al realizar el corte, estos espacios se magnifican, inclusive llegando a tener comunicación con el exterior. Tanto la cáscara como la pulpa aparentemente no sufren un cambio drástico en su componente elástico, y el componente viscoso de la pulpa tampoco varía significativamente.

Por otro lado, al realizar la deshidratación osmótica (DO) al fruto entero y cortado, el cambio en las propiedades elásticas es más severo. La DO disminuyó drásticamente los valores de los 3 componentes elásticos y de los 2 componentes viscosos. La DO es conocida por un proceso de transferencia de masa que tiene el fin de deshidratar los tejidos debido a la diferencia de presión osmótica entre la solución externa y el producto [21]. Esto causó que las células del arándano pierdan agua y con ello pierdan turgencia y se encojan de tamaño, lo cual afectó las propiedades mecánicas. Este cambio de textura se magnificó con el corte realizado los arándanos, ya que facilitó el ingreso de la solución osmótica y así la aceleración de la pérdida de agua. Desde el punto de vista del procesamiento, esto es ideal para incrementar la conservación de los frutos al tener menor actividad de agua. Sin embargo, la textura sensorial del producto podrá ser afectada.

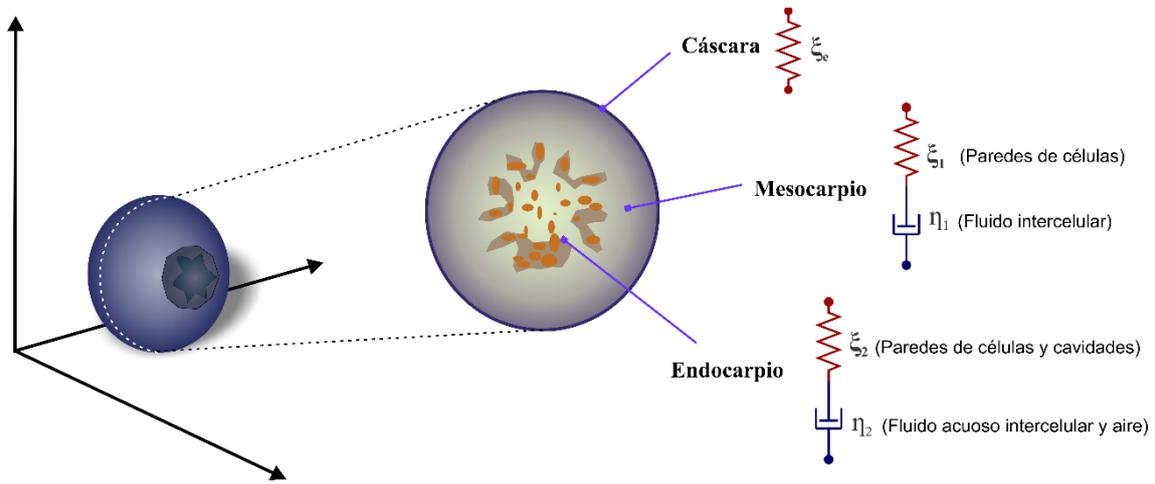


Fig. 4 Correlación de los elementos elásticos y viscosos del modelo generalizado de Maxwell con la estructura del arándano.

TABLA I

PARÁMETROS DEL MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LA CURVA DE ESFUERZO-RELAJACIÓN DE ARÁNDANOS ENTEROS Y CORTADOS, EN FRESCO Y DESHIDRATADOS OSMÓTICAMENTE. LOS DATOS REPRESENTAN EL PROMEDIO \pm DESVIACIÓN ESTÁNDAR. LAS LETRAS MAYÚSCULAS REPRESENTAN LA COMPARACIÓN DE TUKEY ($P < 0.05$) ENTRE LAS MUESTRAS FRESCAS Y DESHIDRATADAS OSMÓTICAMENTE; LAS LETRAS MINÚSCULAS LA COMPARACIÓN DE TUKEY ($P < 0.05$) ENTRE MUESTRAS ENTERAS Y CORTADAS.

Modelo	Parámetro	Fresco		Deshidratado Osmóticamente	
		E	C	E-DO	C-DO
	ϵ (Deformación)	0.077 ± 0.006	0.080 ± 0.006	0.080 ± 0.010	0.084 ± 0.012
Maxwell	τ_1 (s)	10.433 ± 0.931^{Ab}	10.983 ± 0.735^{Aa}	10.147 ± 1.275^{Ab}	11.006 ± 0.741^{Aa}
	τ_2 (s)	0.680 ± 0.075^{Ba}	0.716 ± 0.066^{Ba}	0.694 ± 0.110^{Ab}	0.801 ± 0.123^{Aa}
	ξ_c (kPa)	72.608 ± 23.346^{Aa}	60.750 ± 21.602^{Aa}	46.959 ± 17.173^{Ba}	23.653 ± 10.442^{Bb}
	ξ_1 (kPa)	22.431 ± 8.132^{Aa}	17.621 ± 6.918^{Aa}	14.654 ± 5.218^{Ba}	9.084 ± 3.923^{Bb}
	ξ_2 (kPa)	20.023 ± 9.035^{Aa}	15.370 ± 7.224^{Ab}	12.634 ± 6.343^{Ba}	7.262 ± 3.182^{Bb}
	η_1 (kPa·s)	233.420 ± 85.313^{Aa}	194.008 ± 78.544^{Aa}	149.180 ± 57.506^{Ba}	99.697 ± 42.570^{Bb}
	η_2 (kPa·s)	13.426 ± 5.614^{Aa}	11.005 ± 5.148^{Ab}	8.699 ± 4.184^{Ba}	5.786 ± 2.504^{Bb}
	R^2	0.996 ± 0.002	0.997 ± 0.001	0.994 ± 0.007	0.996 ± 0.003
	RMSD	0.011 ± 0.005	0.008 ± 0.003	0.009 ± 0.005	0.005 ± 0.003
	NRMSD	0.328 ± 0.080	0.303 ± 0.033	0.395 ± 0.192	0.372 ± 0.096
	a	0.996 ± 0.005	0.997 ± 0.002	0.992 ± 0.011	0.996 ± 0.003
b	0.026 ± 0.025	0.017 ± 0.010	0.030 ± 0.047	0.010 ± 0.012	
Peg	k_1 (s)	4.911 ± 0.767^{Ab}	5.631 ± 0.589^{Aa}	4.528 ± 0.490^{Bb}	4.985 ± 0.403^{Ba}
	k_2 (1/s)	2.633 ± 0.131^{Aa}	2.776 ± 0.133^{Aa}	2.552 ± 0.201^{Aa}	2.333 ± 0.145^{Bb}
	R^2	0.962 ± 0.004	0.964 ± 0.002	0.961 ± 0.004	0.966 ± 0.002
	RMSD	0.324 ± 0.728	0.199 ± 0.435	0.139 ± 0.303	0.063 ± 0.128
	NRMSD	8.419 ± 19.991	7.455 ± 19.090	4.646 ± 8.170	3.696 ± 7.482
	a	1.039 ± 0.001	1.040 ± 0.003	1.034 ± 0.014	1.040 ± 0.003
	b	-0.235 ± 0.084	-0.205 ± 0.067	-0.147 ± 0.060	-0.092 ± 0.045
Guo-Campanella	k_G (kPa)	102.779 ± 34.264^{Aa}	84.641 ± 31.091^{Ab}	65.683 ± 23.659^{Ba}	35.407 ± 15.735^{Bb}
	α	0.081 ± 0.004^{Aa}	0.076 ± 0.004^{Ba}	0.079 ± 0.008^{Ab}	0.089 ± 0.013^{Aa}
	R^2	0.992 ± 0.003	0.990 ± 0.003	0.979 ± 0.061	0.971 ± 0.062
	RMSD	0.030 ± 0.018	0.015 ± 0.005	0.017 ± 0.010	0.013 ± 0.005
	NRMSD	0.836 ± 0.227	0.590 ± 0.119	0.842 ± 0.743	1.096 ± 0.927
	a	0.999 ± 0.023	0.994 ± 0.029	1.120 ± 0.920	1.047 ± 0.822
	b	0.029 ± 0.094	0.056 ± 0.112	0.617 ± 1.637	0.283 ± 0.494

Al analizar la aplicación del modelo de Peleg (Tabla I), es posible también obtener información de los cambios de las propiedades viscoelásticas de los arándanos ante el efecto del procesamiento. Sin embargo, al tener solo dos parámetros la información será más global. La inversa del parámetro k_1 , indica la velocidad de caída de la curva de relajación. Un valor que directamente no proporciona información sobre cambios estructurales, aunque se puede inferir que un mayor valor de k_1 , como el observado en las muestras frescas enteras (E), indicaría una mayor resistencia a la disminución del esfuerzo de compresión en el tiempo. Por otro lado, el parámetro k_2 indica el "grado de solidez" del producto, el cual fue una información más útil: mientras más se aleje de 1, más "sólido" sería el producto. En la Tabla I podemos apreciar que el valor de k_2 solo fue diferente significativamente cuando se realizó la DO junto al corte (C-DO). Este tratamiento causó disminución del valor del parámetro, indicando pérdida de solidez del fruto. Esto confirma que la DO y el corte intensificaron la deshidratación de las células del fruto, disminuyendo su turgencia y estabilidad a la compresión.

Finalmente, el modelo de Guo-Campanella (Tabla I) cuenta con dos parámetros, el módulo viscoelástico (k_G) y el orden fraccional (α) que indica que tan cerca está el material de un sólido o líquido. Como el valor de α es cercano a 0 para todos los tratamientos, el valor de k_G representaría en su mayoría a un módulo elástico. Respecto a este valor, se puede apreciar que disminuye significativamente cuando el arándano es cortado y/o deshidratado osmóticamente. Cabe indicar que el parámetro k_G podría indicar una representación global de los elementos elásticos del modelo de Maxwell [18], lo cual explicaría el efecto intensificado de los tratamientos en la reducción del módulo elástico.

IV. CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra que los pretratamientos de deshidratación osmótica (DO) y corte tienen un impacto significativo en las propiedades viscoelásticas de los arándanos de descarte. A través de la aplicación de tres modelos matemáticos —el modelo generalizado de Maxwell, el modelo de Peleg y el modelo de Guo-Campanella— se identificaron posibles cambios en la estructura y composición del fruto. Los resultados indicaron que la deshidratación osmótica y el corte reducen la fuerza de compresión inicial, evidenciando la alteración de las propiedades mecánicas del arándano. El modelo generalizado de Maxwell, con el mejor ajuste y su capacidad de incluir más parámetros, proporcionó una descripción más detallada del comportamiento viscoelástico, mostrando que los elementos elásticos y viscosos disminuyeron significativamente con estos tratamientos. Los elementos elásticos ξ_e , ξ_1 y ξ_2 reflejaron los cambios en la cáscara, pulpa y endocarpio, respectivamente, mientras que los componentes viscosos η_1 y η_2 representaron el citoplasma y el agua y/o aire intercelular. Por otro lado, el modelo de Peleg, aunque con menos parámetros con posibilidad de interpretación, indicó que la DO junto al corte produjo una menor "solidez" del fruto, revelando una mayor pérdida de turgencia. Finalmente, el modelo de Guo-Campanella mostró una disminución significativa en el módulo viscoelástico (k_G),

sugiriendo que el arándano es menos elástico después de los tratamientos.

En conclusión, ambos pretratamientos, especialmente cuando se combinan, afectan significativamente las propiedades mecánicas de los arándanos de descarte, lo cual es importante tener en consideración para posteriores procesos y calidad del producto final.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (CONCYTEC) por la subvención de la presente investigación a través del programa PROCIENCIA, según contrato PE501086399-2024-PROCIENCIA.

REFERENCIAS

- [1] A. Rashidinejad, "Blueberries," in *Nutritional composition and antioxidant properties of fruits and vegetables*, ed: Elsevier, 2020, pp. 467-482.
- [2] A. J. Stull, A. Cassidy, L. Djousse, S. A. Johnson, R. Krikorian, J. W. Lampe, et al., "The state of the science on the health benefits of blueberries: a perspective," *Frontiers in Nutrition*, vol. 11, p. 1415737, 2024.
- [3] R. Pérez, A. Laca, A. Laca, and M. Díaz, "Environmental behaviour of blueberry production at small-scale in Northern Spain and improvement opportunities," *Journal of Cleaner Production*, vol. 339, p. 130594, 2022.
- [4] M. Smith, K. Marley, D. Seigler, K. Singletary, and B. Meline, "Bioactive properties of wild blueberry fruits," *Journal of Food Science*, vol. 65, pp. 352-356, 2000.
- [5] N. L. Huamán-Castilla, C. Copa-Chipana, L. O. Mamani-Apaza, O. M. Luque-Vilca, C. N. Campos-Quiróz, F. Zirena-Vilca, et al., "Selective Recovery of Polyphenols from Discarded Blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) Using Hot Pressurized Liquid Extraction Combined with Isopropanol as an Environmentally Friendly Solvent," *Foods*, vol. 12, p. 3694, 2023.
- [6] E. Dermesonlouoglou, A. Chalkia, and P. Taoukis, "Application of osmotic dehydration to improve the quality of dried goji berry," *Journal of food engineering*, vol. 232, pp. 36-43, 2018.
- [7] P. Munzenmayer, J. Ulloa, M. Pinto, C. Ramirez, P. Valencia, R. Simpson, and S. Almonacid, "Freeze-drying of blueberries: Effects of carbon dioxide (CO₂) laser perforation as skin pretreatment to improve mass transfer, primary drying time, and quality," *Foods*, vol. 9, pp. 211, 2020.
- [8] E. Jakubczyk, E. Tryzno-Gendek, A. Kot, A. Kamińska-Dwórznička, and D. Nowak, "Pre-Treatment Impact on Freeze-Drying Process and Properties of Dried Blueberries," *Processes*, vol. 13, pp. 537, 2025.
- [9] H. Lu, D. Ma, J. Wang, and J. Yu, "Research on mechanical behavior of viscoelastic food material in the mode of compressed chewing," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, p. 581424, 2015.

- [10] R. Cherizol, M. Sain, and J. Tjong, "Review of non-Newtonian mathematical models for rheological characteristics of viscoelastic composites," *Green and Sustainable Chemistry*, vol. 5, p. 6, 2015.
- [11] J. A. Abbott, "Quality measurement of fruits and vegetables," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 15, pp. 207-225, 1999/03/01/ 1999.
- [12] S. Rivera, L. Giongo, F. Cappai, H. Kerckhoffs, S. Sofkova-Bobcheva, D. Hutchins, et al., "Blueberry firmness-A review of the textural and mechanical properties used in quality evaluations," *Postharvest Biology and Technology*, vol. 192, p. 112016, 2022.
- [13] Q. Xu and B. Engquist, "A mathematical model for fitting and predicting relaxation modulus and simulating viscoelastic responses," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 474, p. 20170540, 2018.
- [14] M. L. Rojas and P. E. D. Augusto, "Ethanol pre-treatment improves vegetable drying and rehydration: Kinetics, mechanisms and impact on viscoelastic properties," *Journal of Food Engineering*, vol. 233, pp. 17-27, SEP 2018 2018.
- [15] M. A. Rao and J. F. Steffe, *Viscoelastic properties of foods: Elsevier Applied Science New York*, 1992.
- [16] J. C. Maxwell, "1. On the Equilibrium of Elastic Solids," *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, vol. 2, pp. 294-296, 1851.
- [17] M. Peleg and J. F. Calzada, "STRESS RELAXATION OF DEFORMED FRUITS AND VEGETABLES," *Journal of Food Science*, vol. 41, pp. 1325-1329, 1976.
- [18] W. Guo and O. H. Campanella, "A Relaxation Model Based on the Application of Fractional Calculus for Describing the Viscoelastic Behavior of Potato Tubers," 2017.
- [19] X. Wan, Z. Wu, D. Sun, L. Long, Q. Song, and C. Gao, "Cytological characteristics of blueberry fruit development," *BMC Plant Biology*, vol. 24, p. 184, 2024.
- [20] A. C. Miano, J. da Costa Pereira, B. Miatelo, and P. E. D. Augusto, "Ultrasound assisted acidification of model foods: Kinetics and impact on structure and viscoelastic properties," *Food Research International*, 2017/07/20/ 2017.
- [21] A. K. Yadav and S. V. Singh, "Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review," *Journal of Food Science and Technology*, vol. 51, pp. 1654-1673, 2014/09/01 2014.