



## EFFECTS OF CONCENTRATION AND TEMPERATURE ON THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF APPLE JUICE

## EFFECTOS DE LA CONCENTRACIÓN Y LA TEMPERATURA SOBRE LAS PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DEL JUGO DE MANZANA

**Olegario Marín-Machuca<sup>1,2\*</sup>; José Iannacone<sup>3,4</sup>; Fredy Aníbal Alvarado-Zambrano<sup>5</sup>; Ahuber Omar Vásquez-Aranda<sup>6</sup>; Ricardo Arnaldo Alvarado-Zambrano<sup>7</sup> & Alexander Quispe-Quispe<sup>8</sup>**

- <sup>1</sup> Laboratorio de Tecnología de Alimentos. Facultad de Oceanografía, Pesquería, Ciencias Alimentarias y Acuicultura. Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV), Lima, Perú.
- <sup>2</sup> Grupo de Investigación Sostenibilidad Ambiental (GISA). Escuela Universitaria de Posgrado. Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV), Lima, Perú.
- <sup>3</sup> Laboratorio de Parasitología. Facultad de Ciencias Biológicas. Escuela de Posgrado, Universidad Ricardo Palma (URP), Lima, Perú.
- <sup>4</sup> Laboratorio de Ecología y Biodiversidad Animal. Facultad de Ciencias Naturales y Matemática. Grupo de Investigación en Sostenibilidad Ambiental (GISA), Escuela Universitaria de Posgrado, Universidad Nacional Federico Villarreal (EUPG-UNFV), Lima, Perú.
- <sup>5</sup> Facultad de Industrias Alimentarias. Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM), Ancash, Perú.
- <sup>6</sup> Laboratorio de Geografía y Medio Ambiente. Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo. Universidad Nacional Federico Villarreal UNFV. Lima, Perú.
- <sup>7</sup> Facultad de Industrias Alimentarias. Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), Huánuco, Perú.
- <sup>8</sup> Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Universidad Nacional San Luis Gonzaga. Ica, Perú.

\* Corresponding Author: [omarin@unfv.edu.pe](mailto:omarin@unfv.edu.pe)

Olegario Marín-Machuca: <https://orcid.org/0000-0001-7615-0986>

José Iannacone: <https://orcid.org/0000-0003-3699-4732>

Fredy Aníbal Alvarado-Zambrano: <https://orcid.org/0000-0002-7213-656x>

Ahuber Omar Vásquez-Aranda: <https://orcid.org/0000-0002-2873-6752>

Ricardo Arnaldo Alvarado-Zambrano: <https://orcid.org/0000-0002-5060-6428>

Alexander Quispe Quispe: <https://orcid.org/0000-0002-3822-6959>

### ABSTRACT

The effects of concentration and temperature on the thermo-physical properties of apple juice were studied, in which density and viscosity were measured at different temperature and concentration conditions, varying from 20°C to 80°C and from 12 to 70° Brix, respectively. Density was determined by

the pycnometer method and viscosity by Hooke's falling sphere method, based on Stokes' law. The density results were correlated several times, arriving, by the least squares method, at a multiple linear regression model, of three terms; while the viscosity results proved to be more difficult to correlate, which, by the least squares method, arrived at a multiple linear regression model, of six terms. The experimental mathematical models can be used to obtain the density and viscosity data within the temperature and concentration conditions indicated in the study.

**Key words:** density – buoyancy and friction forces – fluid flow – form and flow resistances – viscosity

## RESUMEN

Se estudió los efectos de la concentración y de la temperatura sobre las propiedades termofísicas del jugo de manzana, en las cuales la densidad y viscosidad fueron medidos a diferentes condiciones de temperatura y concentración, variando de 20°C a 80°C y de 12 a 70° Brix, respectivamente. La densidad fue determinada por el método del picnómetro y la viscosidad por el método de caída de esfera de Hooke, basada en la ley de Stokes. Los resultados de densidad se correlacionaron por el método de los mínimos cuadrados, y se determinó un modelo de regresión lineal múltiple, de tres términos; mientras que los resultados de viscosidad presentaron una mayor dificultad para correlación, que, por el método de los mínimos cuadrados se llegó a un modelo de regresión lineal múltiple, de seis términos. Los modelos matemáticos experimentales pueden ser usados para obtener los datos de densidad y viscosidad dentro de las condiciones de temperatura y concentración indicados en el estudio.

**Palabras clave:** densidad – fuerzas de flotación y fricción – flujo de fluidos – resistencias de forma y flujo – viscosidad

## INTRODUCCIÓN

La falta de información de las propiedades termofísicas de los alimentos ocasiona grandes pérdidas de dinero en cuanto a servicios, tiempos operativos, horas mano hombre y otros aspectos (Welti-Chanes *et al.*, 2015; Cardona-Palacio, 2016). El conocimiento de la densidad y la viscosidad es una

información muy importante en un gran número de investigaciones y aplicaciones de la ingeniería de los procesos alimentarios, que generalmente causan problemas de funcionamiento de equipos y optimización de manejo de equipos, tales como: tanques, bombas, serpentines, elevadores, transportadores, chilles, intercambiadores, congeladores, evaporadores, etc.

(Toledo, 1991; Orellana-Palma *et al.*, 2020). La exploración de las propiedades fisicoquímicas de los zumos es crucial para analizar la calidad nutricional y bioactivo del zumo, y puede utilizarse incluso para la autenticidad del zumo de manzana. La estimación de la calidad del zumo se basa en análisis tales como contenido de sólidos solubles, acidez titulable, cenizas, pH, prolina, densidad, valores del índice formal, azúcares, ácidos orgánicos no volátiles, minerales, aminoácidos, fenoles y relaciones isotópicas de carbono. Los resultados de diversas investigaciones sugieren que algunas propiedades fisicoquímicas de los zumos de frutas pueden estar fuertemente relacionadas entre sí (Constenla *et al.*, 1989; Wilczyński *et al.*, 2019; Rydzak *et al.*, 2020).

La viscosidad es un atributo fundamental para determinar la calidad de muchos alimentos, líquidos y semisólidos (Capriste & Lozano, 1988; Alvis *et al.*, 2016). Es en cierto modo, una resistencia de rozamiento, y así se denomina algunas veces, añadiendo al calificativo de “Interno” (Charm, 2008). El proceso de producción de zumos de frutas debe caracterizarse por una alta eficiencia, y dar como resultado el producto final con un alto contenido de sólidos solubles, baja acidez y una alta proporción de componentes saludables; donde las prensas de tornillo son cada vez más populares, especialmente en pequeñas explotaciones agrícolas, y la construcción de estas tiene un gran impacto en el rendimiento del prensado y probablemente en las

características de calidad del zumo; además en la actualidad, existen pocas investigaciones sobre la composición fisicoquímica de los zumos de manzana procesados mediante diferentes técnicas de extracción (Kobus *et al.*, 2018).

Para probar que la definición anterior tiene sentido, es preciso: a) que pueda medirse  $\mu$ , y b) que resulte independiente de  $v$  y de su gradiente. El movimiento de un líquido en un tubo puede en efecto, ser laminar o turbulento. Para el turbulento no hay definición de coeficiente de viscosidad ( $\mu$ ). Tomando un tubo suficientemente largo y midiendo el gasto en función de las presiones externas y del diámetro, se puede, en efecto, conocer  $\mu$ . Considere una capa o extracto por dos cilindros concéntricos de altura  $dx$  y de bases circulares con los radios  $r$  y  $(r+dr)$ . Sea  $R$  el radio del tubo. Si el movimiento del estrato cilíndrico es estacionario, habrá equilibrio entre las presiones en las bases y el rozamiento en las caras. Las presiones en las bases tienen la resultante siguiente:  $2\pi r dr dp$ , siendo  $dp$  la diferencia de niveles piezométricos en ellas y en la cara anterior se ejerce un rozamiento igual a:  $\mu dx 2\pi r (dv/dn)$ , dirigido en el sentido del movimiento.

En la cara superior la fuerza de rozamiento es contraria y tiene un valor de:

$$-\mu dx \left[ 2\pi r \frac{dv}{dr} + \frac{dv}{dr} \left( 2\pi r \frac{dv}{dr} \right) dr \right]$$

La diferencia entre ambas caras a de equilibrar la diferencia de presiones en las bases, luego se tiene:

$-\mu dx \left[ 2\pi r \frac{dv}{dr} + \frac{dv}{dr} \left( 2\pi r \frac{dv}{dr} \right) dr \right]$  o lo que es igual a:  $-\frac{dp}{dx} = \frac{\mu}{r} \cdot \frac{d}{dr} \left( \frac{rdv}{dr} \right)$

Esta ecuación indica que  $p$  decrece en el sentido del movimiento. Integrando y llamando  $p_1$  y  $p_2$  a los valores de  $p$  correspondientes a los extremos de una longitud  $l$  del tubo:

$$\frac{p_1 - p_2}{l} = \text{constante} = \frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left( \frac{rdv}{dr} \right)$$

De esta ecuación se deduce:

$$v = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{p_1 - p_2}{l} (R^2 - r^2)$$

Conociendo la velocidad  $v$  para el estrato cilíndrico a la distancia  $r$  del eje, se conoce fácilmente el gasto correspondiente  $dq = 2\pi r dr \rho v$ , siendo  $l$  la densidad del fluido líquido, y el gasto total  $Q$  será la integral de la anterior, referido a todos los estratos cilíndricos, o sea:

$$Q = \int_0^R dq = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{\phi}{\mu} \cdot \frac{p_1 - p_2}{l} \cdot R^4$$

que es la fórmula de Poiseuille. El gasto es proporcional a la 4<sup>ta</sup> potencia del diámetro. En esta ley, supuesta exacta, están fundados los viscosímetros o aparatos para medir  $\mu$  a una temperatura dada. El agua a 20,2°C tiene la viscosidad de 1 cP (centipoise); el aceite de linaza a 20°C, 1 poise y el aceite de resino a 20°C, 10 poises. El valor recíproco ( $1/\mu$ ) se llama fluidez (Cardona-Palacio, 2016). Uno de los tantos métodos para determinar el coeficiente de viscosidad  $\mu$  es midiendo el descenso de una esfera a través de un volumen infinito de líquido, que se

basa en la ley de Stokes (Sir George Stokes, 1818-1903, físico irlandés).

Kobus *et al.* (2019) mencionan que el comportamiento de las propiedades termofísicas como densidad y viscosidad es de primordial importancia para la industria de los jugos de fruta. Esta información es necesaria para una variedad de investigaciones y aplicaciones en ingeniería. Para diseñar y optimizar la operación de manejo y procesos unitarios en tanques, bombas, tuberías, enfriadores (refrigerantes), calentadores y vaporizadores; es necesario la información sobre las propiedades termo físicas y termodinámicas en un amplio rango de concentraciones y de temperatura. Los alimentos más líquidos no presentan un comportamiento newtoniano, afirmando que esto significa que su viscosidad depende de la velocidad de cizallamiento y debido a esto, existen algunos problemas a la hora de comparar las curvas de viscosidad de los zumos producidos a partir de diferentes materias primas; influyendo además que la temperatura y el contenido de sólidos solubles son otros factores que modifican el comportamiento de los zumos de frutas, y a su vez la alta variabilidad de las propiedades reológicas con la temperatura y la concentración a veces hace que las mediciones sean imposibles para todas las velocidades de cizallamiento debido a que se excede el rango de trabajo del viscosímetro (Kobus *et al.*, 2019).

La manzana ha sido ampliamente reconocida como una fruta muy consumida en todo el mundo. En concreto, esta fruta presentó en 2019/2020

una producción mundial de aproximadamente 76 M de t, así la industria alimentaria ha aplicado tecnologías tradicionales para mantener esta fruta disponible durante todo el año a través del desarrollo de numerosos productos a partir de la manzana fresca, como zumos, jaleas, mermeladas, purés, vinos y salsas, entre otros; pero la concentración por evaporación, la tecnología más utilizada en la industria alimentaria presenta desventajas debido a las altas temperaturas utilizadas, que aceleran la degradación de las propiedades fisicoquímicas y de los compuestos bioactivos, y afectan a los beneficios para la salud asociados al consumo de fruta, desarrollándose tecnologías potenciales y alternativas no térmicas como la luz UV pulsada (PL), los ultrasonidos (US), la irradiación (IR) y el campo eléctrico pulsado (PEF); estudiándose también el procesamiento a alta presión (HPP), el plasma frío (CP) y la crioconcentración (CC) para proteger y preservar varios componentes termolábiles, y así conservar importantes características nutricionales y sensoriales en el producto final nutricionales y sensoriales en el producto final (Orellana-Palma *et al.*, 2020).

El propósito del presente trabajo fue medir la densidad y la viscosidad del jugo de manzana a diferentes concentraciones y temperaturas, graficar los fenómenos de densidad y viscosidad, correlacionar y desarrollar un modelo matemático para cada una de las propiedades y predecir estas propiedades bajo diferentes condiciones de concentración y temperatura.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La manzana fue sometida a un proceso extracción por presión, obteniéndose un jugo oscuro y denso. Dicho jugo fue clarificado y controlado su proceso de pardeamiento enzimático. El Jugo de manzana obtenido tiene diversos sólidos solubles, en el rango de 12 a 70° Brix. Se reconstituyó con agua destilada a 70° Brix de concentración. Las principales características de este concentrado son: sólidos solubles, azúcares reductores, azúcares totales, acidez y aminoácidos totales. Los sólidos solubles fueron medidos en °Brix con un refractómetro a temperaturas de 20, 40, 60 y 80 °C, en un rango desde 20° a 80°C, controladas cuidadosamente a  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  con un baño maría y a temperatura constante.

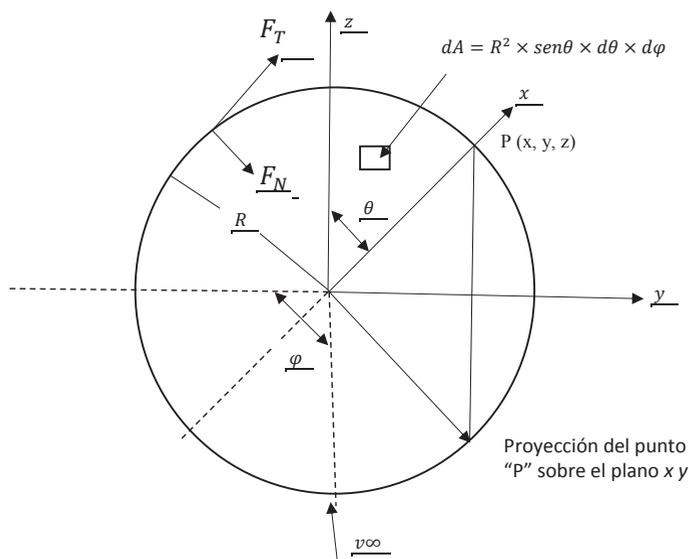
**Medición de la densidad:** La densidad fue determinada por el método del picnómetro, método que fue contrastado con soluciones de sacarosa, cuyas densidades a varias concentraciones y temperaturas son registradas por Ahmada *et al.* (2020). Los estudios basados en modelos son importantes para evitar la experimentación innecesaria, que puede consumir tiempo y recursos; donde la mayoría de los modelos teóricos disponibles en la literatura se basan en el enfoque de la resistencia en serie, y consideran sólo el transporte de agua pura para la validación experimental, descuidando el efecto de los cambios de viscosidad del zumo de fruta. Se analizó el efecto de dos salmueras diferentes en el flujo transmembrana y se observó que el cloruro de calcio induce un mayor flu-

jo transmembrana de calcio en comparación con el cloruro de sodio en todas las concentraciones probadas. Además, la temperatura parecía presentar un efecto relevante en el flujo transmembrana, y la concentración de salmuera como el factor más influyente en el rendimiento de la membrana, utilizando ecuaciones fenomenológicas de transferencia de masa y energía (Ahmada *et al.*, 2020).

La densidad fue determinada pesando el jugo contenido un picnómetro volumétrico normalizado. Los picnómetros de 25 y 50 mL de capacidad fueron calibrados con agua destilada para cada temperatura. Las correcciones por temperatura demostraron

ser despreciables, para lo cual se hizo un mínimo de cinco repeticiones por muestra.

**Medición de la viscosidad:** Se encontró que el jugo de manzana se comportaba como un fluido Newtoniano sobre los rangos de concentración y de temperatura usados en este trabajo (Saravacos, 1970; Ibartz *et al.*, 1987). La viscosidad dinámica fue determinada usando el método de caída de la esfera de Hooke, utilizando la ecuación  $\mu = \frac{2R^2g(\rho_s - \rho_p)}{9V_{\infty}}$ , que se basa en la ley de Stokes; cuyo desarrollo analítico es descrito y demostrado a continuación (Fig. 1):



**Figura 1.** Fuerza Neta = Fuerza Tangencial + Fuerza Normal ( $F_{\text{Neta}} = F_T + F_N$ ).

**Fuerza Neta** = Es la que el fluido ejerce sobre la esfera y se calcula integrando la fuerza tangencial y la

fuerza normal sobre la superficie de la esfera.

**Integración de la Fuerza Tangencial.** En cada punto de la superficie de la esfera, existe un esfuerzo cortante ( $\tau$ ), que actúa tangencialmente.  $\tau$  actúa en la dirección del ángulo  $\theta$ , sobre la unidad de área de la superficie esférica

cuyo componente “z” por unidad de área es:  $(-\tau_{r\theta}) (-\text{sen}\theta)$ , multiplicado por  $dA$  e integrando sobre la superficie de la esfera, se obtiene la fuerza resultante en dirección “z”.

$$F_T = \int_0^{2\pi} \left[ \int_0^\pi (-\tau_{r\theta})(-\text{sen}\theta \cdot R^2 \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta) \right] d\varphi \dots (1)$$

$$\text{donde: } \tau_{r\theta} = \frac{3\mu v_\infty}{2R} \left(\frac{R}{r}\right)^4 \text{sen}\theta$$

Pero:  $R = r \Rightarrow \tau_{r\theta} = \frac{3\mu v_\infty}{2R} \text{sen}\theta$  (2)

Reemplazando (2) en (1):

$$F_T = \int_0^{2\pi} \left[ \int_0^\pi \frac{3\mu v_\infty}{2R} \cdot \text{sen}\theta \cdot R^2 \cdot \text{sen}\theta \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta \right] d\varphi$$

$$F_T = \int_0^{2\pi} \left[ \int_0^\pi \frac{3}{2} \mu v_\infty R \text{sen}^3 \theta d\theta \right] d\varphi$$

$$F_T = \int_0^{2\pi} \left[ \frac{3}{2} \mu v_\infty R \int_0^\pi \text{sen}^3 \theta d\theta \right] d\varphi$$

$$\int_0^{2\pi} \left[ \frac{3}{2} \mu v_\infty R \left( -\cos \theta + \frac{1}{3} \cos^3 \theta \right) \Big|_0^\pi \right] d\varphi$$

$$F_T = \int_0^{2\pi} \frac{3}{2} \mu v_\infty R \left[ 1 + \frac{1}{3}(-1) - \left( -1 + \frac{1}{3} \right) \right] d\theta = \frac{3}{2} \cdot \mu \cdot v_\infty R \cdot \frac{4}{3} \int_0^{2\pi} d\varphi$$

$F_T = 4\pi\mu v_\infty R$  (Resistencia de Fricción)

**Integración de la Fuerza Normal.** En cada punto de la superficie existe una presión sobre el sólido que actúa perpendicularmente a la superficie. El

componente “z” de esta presión es  $(-P \cos\theta)$ . Esta presión local multiplica al área superficial sobre la que actúa.

$$F_N = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (-P|r = R \cdot \cos \theta) R^2 \text{sen}\theta d\theta d\varphi \dots (3)$$

donde “P” se distribuye en la superficie de la esfera como:

$$P|_{r=R} = P_0 - \rho g R \cos \varphi - \frac{3\mu v_\infty}{2R} \cos \theta \dots \dots \dots (4)$$

Reemplazando (4) en (3):

$$F_N = \int_0^{2\pi} \left[ \int_0^\pi \left( -P_0 + \rho g R \cos \theta + \frac{3\mu v_\infty}{2R} \cos \theta \right) \cos \theta R^2 \text{sen}\theta d\theta d\varphi \right]$$

Pero  $P_0 = 0$ , cuando  $z=0$

$$F_N = \int_0^{2\pi} \left[ \int_0^\pi \left( \rho g \cos^2 \theta R^3 \sin \theta + \frac{3}{2} \mu v_\infty \cos^2 \theta R^2 \sin \theta \right) d\theta \right] d\varphi$$

$$F_N = \int_0^{2\pi} \left[ \rho g R^3 \int_0^\pi \cos^2 \theta \sin \theta d\theta + \frac{3}{2} \mu v_\infty R \int_0^\pi \cos^2 \theta \sin \theta d\theta \right] d\varphi$$

$$F_N = \int_0^{2\pi} \left[ \rho g R^3 \left| -\frac{1}{3} \cos^3 \theta \right|_0^\pi + \frac{3}{2} \mu v_\infty R \left| -\frac{1}{3} \cos^3 \theta \right|_0^\pi \right] d\varphi$$

$$F_N = \int_0^{2\pi} \left[ \rho g R^3 \left( \frac{2}{3} \right) + \frac{3}{2} \mu v_\infty R \left( \frac{2}{3} \right) \right] d\varphi$$

$$F_N = \frac{2}{3} \rho g R^3 \int_0^{2\pi} d\varphi + \mu v_\infty R \int_0^{2\pi} 1 d\varphi$$

$$F_N = \frac{2}{3} \rho g R^3 \cdot \varphi \Big|_0^{2\pi} + \mu v_\infty R \cdot \varphi \Big|_0^{2\pi}$$

$$F_N = \frac{4}{3} \pi \rho g R^3 + 2\pi R v_\infty \mu$$



Luego: Fuerza Neta:

$$\underbrace{\frac{4}{3} \pi R^3 \rho g}_{\substack{\uparrow \\ \text{Fuerza de} \\ \text{Flotaci3n}}} + \underbrace{2\pi \mu R v_\infty}_{\substack{\uparrow \\ \text{Resistencia} \\ \text{de Forma}}} + \underbrace{4\pi \mu R v_\infty}_{\substack{\uparrow \\ \text{Resistencia} \\ \text{de Fricci3n}}}$$

$$F_{\text{Normal}} = \boxed{\frac{4}{3} \pi R^3 \rho g + 6\pi \mu R v_\infty}$$

$\uparrow$ Empuje                       $\uparrow$ Resistencia debido al Movimiento de Flujo  
 alrededor de la esfera

**Obtenci3n de la viscosidad a partir de la velocidad final de la caida de una esfera.**

- Si una esfera en reposo se deja caer en un fluido viscoso, adquiere un movimiento acelerado, hasta que alcanza una velocidad constante (final).

- Cuando alcanza este estado, la suma de todas las fuerzas que actúan sobre la esfera es cero.
- La fuerza de gravedad actúa sobre la esfera en direcci3n de la caida y el empuje y fuerza debido al movimiento de la esfera actúan en sentido contrario.

$$\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_s g = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_f g + 6\pi \mu R v_\infty \left\{ \begin{array}{l} F = m \cdot a; F = m \cdot g \\ m = \rho v; v = \frac{4}{3} \pi R^3 \end{array} \right.$$

$$\frac{4}{3} \pi R^3 g (\rho_s - \rho_f) = 6\pi \mu R v_\infty$$

$$\mu = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3 g(\rho_s - \rho_f)}{6\pi R v \infty}$$

$$\Rightarrow \mu = \frac{2R^2 g(\rho_s - \rho_f)}{9v \infty} \quad \dots (5)$$

Donde: R = radio de la esfera (cm),  $\rho_s$  = densidad de la esfera ( $\text{g/cm}^3$ ),  $\rho_f$  = densidad del fluido ( $\text{g/cm}^3$ ), g = aceleración de la gravedad ( $980,7 \text{ cm/seg}$ ),  $v$  = velocidad final (límite o constante) ( $\text{cm/seg}$ ) y  $\mu$  = viscosidad dinámica (cP)

$$\text{Condición: } \frac{2Rv \infty \rho_f}{\mu} < 0,1$$

**Aspectos éticos:** Los autores declaran que no presentan ningún aspecto ético según normatividad nacional e internacional vigente.

## RESULTADOS

**Densidad.** Los resultados experimentales para siete concentraciones,

**Tabla 1.** Densidad experimental ( $\text{g/mL}$ ) del jugo de manzana como una función de concentración ( $x$ ) y temperatura ( $T$ ), considerando las tres mejores pruebas experimentales.

Concentración (x), °Brix	Temperatura (T), °C			
	20	40	60	80
10	1,04±0,62	1,03±0,52	1,02±0,12	1,00±0,13
20	1,08±1,13	1,07±0,61	1,06±0,18	1,04±0,14
30	1,13±0,82	1,12±0,84	1,10±0,32	1,08±0,22
40	1,18±0,14	1,17±0,22	1,15±0,25	1,13±0,29
50	1,24±0,62	1,23±0,31	1,21±0,19	1,19±0,42
60	1,31±0,73	1,29±0,72	1,28±0,22	1,25±0,18
70	1,42±0,48	1,39±0,85	1,36±0,39	1,34±0,42

$$\rho = 1,22842 + 0,005768x - 0,0008786 \times T \quad \dots (6)$$

$$(r^2 = 0,98)$$

Para aplicar la Ecuación (6), la temperatura es absoluta (K).

seleccionadas en siete niveles de diez a 70° Brix y a 20; 40; 60 y 80°C, están representados en la Tabla 1 y Ecuación (6). Hubo una muy fuerte dependencia de densidad con la concentración y una notable disminución tanto como se incrementó la temperatura. Se usaron diferentes tipos de ecuaciones para correlacionar los datos. Muchos de ellos resultaron ser polinomios complejos en concentración y temperatura. En el presente trabajo muchas ecuaciones simples fueron propuestas, donde la ecuación (6) resultó ser la más apropiada para predecir la densidad (regresión lineal múltiple).

**Viscosidad.** Los resultados experimentales de la viscosidad se muestran en la Tabla 2. La viscosidad del jugo de manzana se incrementa rápidamente con los sólidos solubles y disminuye considerablemente conforme la temperatura se incrementa desde 20°C hasta 80°C, particularmente en concentraciones altas. Como en el caso de la densidad, la viscosidad de una solución es una función de las fuerzas intermoleculares y las interacciones agua-soluto que limitan el movimiento molecular.

Cuando más solutos como azúcares se disuelven en la solución, la viscosidad se incrementa por causa del incremento de los enlaces hidrógeno

con grupos hidroxilos y la distorsión en los patrones de velocidad del líquido por la hidratación de moléculas de solutos. Cuando la solución es calentada la viscosidad disminuye mientras la energía térmica de las moléculas se incrementa y las distancias intermoleculares disminuyen debido a la expansión térmica. El efecto de la temperatura sobre la viscosidad puede describirse por la relación de Arrhenius:

$$\mu = \mu_0 \times e^{\left(\frac{E_a}{RT}\right)} \dots (7)$$

Donde:  $\mu$  es la viscosidad (mPa.s o cP),  $\mu_0$  es un factor pre exponencial,  $E_a$  es la energía de activación de flujo (kcal/g mol) y R constante de los gases (1,9872 cal/mol k).

**Tabla 2.** Viscosidad dinámica (mPa.s) del jugo de manzana como una función de concentración (x) y temperatura (T), considerando las ocho mejores pruebas experimentales.

Concentración (x), °Brix	Temperatura (T), °C			
	20	40	60	80
12,5	1,45±0,941	0,97±0,119	0,75±0,483	0,55±0,731
20,6	1,86±0,836	1,22±0,221	0,86±0,385	0,61±0,843
30,5	3,01±0,217	1,73±0,481	1,12±0,692	0,72±0,923
40,0	4,92±0,584	2,82±0,632	1,75±0,841	1,01±0,841
50,3	9,71±0,692	5,21±0,842	2,95±0,926	1,59±0,612
60,3	22,56±0,114	11,36±0,932	5,73±1,184	2,90±0,921
72,5	80,38±0,481	36,19±0,832	16,77±0,842	6,56±0,835

$$\mu = 4,9124 \times e^{(0,12972x - 3,087 \times 10^{-5}T + 6,5465 \times 10^{-4}x^2 - 1,74875 \times 10^{-5}T^2 - 4,038 \times 10^{-4}Tx)}$$

$$r^2 = 0,99$$

Para utilizar la ecuación (8) la temperatura es absoluta (K).

## DISCUSIÓN

Los modelos de estimación y predicción, tanto para la densidad y viscosidad resultaron ser expresiones multivariadas, coincidiendo con lo reportado por Alvis *et al.* (2016).

Se usaron diferentes ecuaciones para correlacionar los datos de densidad experimental del jugo de manzana y muchos de ellos resultaron ser polinomios complejos, con un coeficiente de correlación ( $r^2$ ) menor que 0,95; no coincidiendo con lo reportado por Orellana-Palma *et al.* (2020). La densidad de alimentos líquidos en función de la temperatura es prácticamente de tendencia lineal, similar y análoga a la del agua (Giraldo-Gómez *et al.*, 2008; Rydzak *et al.*, 2020). Una razonable y buena concordancia se obtuvo cuando estos resultados experimentales se compararon con los resultados en estudios previos sobre la viscosidad del jugo de manzana (Ibartz *et al.*, 1987; Wilczyński *et al.*, 2019). Se obtuvo una buena concordancia en cuanto a la viscosidad del jugo de manzana con los resultados obtenidos por Saravacos (1970) e Ibartz *et al.* (1987). La viscosidad del jugo de manzana a temperatura constante puede ser representada por una relación exponencial, coincidiendo con lo que menciona Ibartz *et al.* (1987). Se sugirieron muchas ecuaciones para describir el efecto de concentración y temperatura sobre la viscosidad de suspensiones, siendo la ecuación de Arrhenius la que describe este fenómeno, mencionado por Giraldo-Gómez *et al.* (2008). Así mismo, el estudio mostró que la temperatura y concentración tienen una

gran influencia en las propiedades termofísicas del jugo de manzana, tales como densidad y viscosidad, y, los modelos obtenidos para dichas propiedades predicen valores estimados hasta con un porcentaje de acercamiento del 98, 78, convencidos de que los resultados de este trabajo tienen aplicación directa en varios procesos de jugos de frutas como flujos de fluidos, transferencia de calor y masa, y fenómenos de transporte (Bird *et al.*, 1982; Kobus *et al.*, 2019).

Concluimos, además que los objetivos planteados en el estudio se han cumplido satisfactoriamente. En cuanto a las recomendaciones planteamos que la temperatura del proceso experimental debe ser controlado y medido con una precisión de 0,5°C, la concentración del fluido a la cual se le hace el análisis viscosimétrico y densitométrico debe ser precisado con hasta 0,5°Brix, el analista debe prepararse adecuadamente con el fin de que el pulso, vista y el tacto estén sincronizados en lo mejor posible, para la cual se recomienda que el número de pruebas en blanco no debe ser menor que treinta, debe medirse con precisión y que la esferilla de Hooke esté en el centro del viscosímetro y que el ángulo de inclinación para la corrección debe ser con exactitud los 10° y se debe tener en cuenta que el factor de correlación debe ser mayor a 0,95 o en el mejor ajuste llegar a valores de 0,98 a más.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Ahmada, S.; Marson, G.V.; Zeba, W.; Rehman, W.U.; Younas, M.; Farrukh, S. & Rezakazemi, M. 2020. Mass transfer modelling of hollow fiber membrane contactor for apple juice concentration using osmotic membrane distillation. *Separation and Purification Technology*, 250: 117209.
- Alvis, A.; Hernández, E. & García-Mogollón, C. 2016. Técnicas de análisis de viscosidad en cátsup. *Interciencia*, 41:709-712.
- Bird, R.B.; Stewart, W.E. & Lightfoot, E.N. 1982. *Fenómenos de transporte*. Ed. Reverté, S.A.
- Capriste, G.H. & Lozano, J.E. 1988. Effect of concentration and pressure on the boiling point rise of apple juice and related sugar solutions *Journal of Food Science*, 53: 865-868.
- Cardona-Palacio, L. F. 2016. Cálculo de la viscosidad de hidrocarburos a partir de la ecuación cúbica de estado de Jarrahian-Heidaryan. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15: 1019-1025.
- Charm, S.E. 2008. *The fundamentals of food engineering*. 3<sup>rd</sup> Ed. AVI, Publ. Co. Westport. Commectient.
- Constenla, D.T.; Lozano, J.E. & Crapiste, G.H. 1989. Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature. *Journal of Food Science*, 54: 663-668.
- Giraldo-Gómez, G.; Gabas, A.; Nicoletti, V. & Telis-Romero, J. 2008. Propiedades termofísicas del jugo concentrado de lulo a temperaturas por encima del punto de congelación. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 30: 90-95.
- Ibartz, A.; Vicente, M. & Graell, J. 1987. Rheological behavior of apple juice and pear juice and their concentrates. *Journal of Food Engineering*, 6: 257-267.
- Kobus, Z.; Nadulski, R.; Anifantis, A.S. & Santoro, F. 2018. *Effect of press construction on yield of pressing and selected quality characteristics of apple juice*. Proceeding's 17<sup>th</sup> International Scientific Conference "Engineering for Rural Development", 23-25 May 2018, Jelgava, Latvia. pp. 652-657.
- Kobus, Z.; Nadulski, R.; Wilczyński, K.; Starek, A.; Zawislak, K.; Rydzak, L. & Andrejko, D. 2019. Modeling of rheological properties of cloudy apple juice using master curve. *CYTA – journal of food*, 17: 648-655.
- Orellana-Palma, P.; Lazo-Mercado, V.; Gianelli, M.P.; Hernández, E.; Zúñiga, R.N. & Petzold, G. 2020. Influence of cry concentration on quality attributes of apple juice (*Malus domestica* cv. Red Fuji). *Applied Sciences*, 10: 959.
- Rydzak, L.; Kobus, Z.; Nadulski, R.; Wilczynski, K.; Pecyna, A.; Santoro, F.; Sagan, A.; Starek-Wójcicka, A. & Krzywicka, M. 2020. Analysis of selected physicochemical properties of commercial apple juices. *Processes*, 8: 1457.
- Saravacos, G. D. 1970. Effect of temperature on viscosity of fruit juices and purees. *Journal of Food Science*, 35:122.

- Toledo, R.T. 1991. *Fundamentals of food process engineering*. 2<sup>nd</sup>. Ed. Van. Nostrand. Reinhold.
- Wolti-Chanes, J.; Gómez-Palomares, O.; Vergara-Balderas, F. & Maris-Alzamora, S. 2015. Aplicaciones de ingeniería y fenómenos de transporte al estudio de la transferencia convectiva de calor en alimentos envasados. *Revista mexicana de ingeniería química*, 4: 89-106.
- Wilczyński, K.; Kobus, Z. & Dzik, D. 2019. Effect of press construction on yield and quality of apple juice. *Sustainability*, 11: 3630.

Received March 17, 2021.

Accepted April 10, 2021.