



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

EFFECTO DE DIFERENTES NIVELES DE CONCENTRACION Y TEMPERATURA DE LA PULPA DE MANZANA (Malus domestica) SOBRE SUS CARACTERISTICAS REOLOGICAS

Línea de investigación:

Competitividad industrial, diversificación productiva y prospectiva

Tesis para optar el grado académico de Maestro en Tecnología de Alimentos

Autor

Alvarado Zambrano, Ricardo Arnaldo

Asesor

Marin Machuca, Olegario

ORCID: 0000-0002-0515-5875

Jurado

Zamora Talaverano, Noe Sabino

Aldave Palacios, Gladis Josefina

Guzman Roca, Julio César

Lima - Perú

2026

EFFECTO DE DIFERENTES NIVELES DE CONCENTRACION Y TEMPERATURA DE LA PULPA DE MANZANA (malus domestica) SOBRE SUS CARACTERISITICAS REOLOGICAS.

INFORME DE ORIGINALIDAD

30%

INDICE DE SIMILITUD

29%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

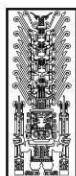
11%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repo.uta.edu.ec	Fuente de Internet	1%
2	repositorio.umsa.bo	Fuente de Internet	1%
3	www.researchgate.net	Fuente de Internet	1%
4	cybertesis.uach.cl	Fuente de Internet	1%
5	fdocuments.ec	Fuente de Internet	1%
6	dokumen.tips	Fuente de Internet	1%
7	www.buenastareas.com	Fuente de Internet	1%
8	myslide.es	Fuente de Internet	1%
9	cienciaeducativa2009.wikispaces.com	Fuente de Internet	1%
10	de.slideshare.net	Fuente de Internet	1%
11	biblioteca.usac.edu.gt	Fuente de Internet	1%
12	repositorio.unh.edu.pe	Fuente de Internet	1%
13	derivadoslacteos.com	Fuente de Internet	1%
14	repositorio.uaaan.mx	Fuente de Internet	1%

Submitted to Instituto Politecnico Nacional



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

EFFECTO DE DIFERENTES NIVELES DE CONCENTRACION Y TEMPERATURA DE LA
PULPA DE MANZANA (*Malus domestica*) SOBRE SUS CARACTERISTICAS REOLOGICAS

Línea de Investigación:

Competitividad industrial, diversificación productiva y prospectiva.

Tesis para optar el grado académico de Maestro en Tecnología de Alimentos

Autor

Alvarado Zambrano, Ricardo Arnaldo

Asesor

Marin Machuca, Olegario

ORCID: 0000-0002-0515-5875

Jurado

Zamora Talaverano, Noe Sabino

Aldave Palacios, Gladis Josefina

Guzman Roca, Julio César

Lima – Perú

2026

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a las personas más importantes en mi vida: mis padres, Martha y Aníbal, y a mi hermano Fredy, junto con toda mi familia. Agradezco profundamente su amor, apoyo constante y el impulso que me brindan a diario. Su motivación y creencia en mí han sido una Nota inagotable de inspiración y fuerza para perseverar en mis esfuerzos y alcanzar mis metas.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios, no solo con palabras, sino con sentimientos genuinos, por darme la vida, su bondad y trazar mi camino. Agradezco la sabiduría y la responsabilidad que me concede para cumplir con cada propósito y meta en mi vida, y por nunca abandonarme.

Mi agradecimiento se extiende a mis familiares por su apoyo incondicional y por estar siempre a mi lado.

Quiero también reconocer a mis docentes y compañeros de la Maestría en Ciencia de los Alimentos, con quienes compartí y aprendí nuevos conocimientos y experiencias. Un agradecimiento especial a mi asesor, **Dr. Olegario Marín Machuca**, por su valiosa orientación, dirección, motivación y apoyo científico durante la elaboración de esta tesis.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que, de una u otra manera, colaboraron y participaron en el desarrollo de esta investigación.

ÍNDICE

RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento de problema.....	1
1.2. Descripción del problema	3
1.3. Formulación del problema	3
1.3.1. <i>Problema general</i>	3
1.3.2. <i>Problemas específicos</i>	4
1.4. Antecedentes	4
1.5. Justificación de la investigación	6
1.6. Limitaciones de la investigación.....	8
1.7. Objetivos	9
1.7.1. <i>Objetivo general</i>	9
1.7.2. <i>Objetivos específicos</i>	9
1.8. Hipótesis	10
II. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1. Marco conceptual	11
III. MÉTODO	45
3.1. Tipo de investigación.....	45
3.2. Población y muestra.....	45
3.3. Operacionalización de variables.	46
3.4. Instrumentos.....	49
3.5. Procedimientos.....	50
3.6. Análisis de datos	50

IV. RESULTADOS	51
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	69
VI. CONCLUSIONES	76
VII. RECOMENDACIONES	77
VIII. REFERENCIAS.....	79
IX. ANEXOS	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Valor de la viscosidad de diferentes materiales.	27
Tabla 2.	Valores de B y C para diversos líquidos	29
Tabla 3.	Dilución acuosa y coeficiente de viscosidad de la leche	31
Tabla 4.	Viscosidades (η), en cP, del concentrado de manzana (<i>Malus domestica</i>) y a temperatura de 55°C a diferentes concentraciones χ (°Brix)	55
Tabla 5.	Viscosidades (η), en cP, del concentrado de manzana (<i>Malus domestica</i>) y a temperatura de 45°C a diferentes concentraciones χ (°Brix)	56
Tabla 6.	Viscosidades (η), en cP, del concentrado de manzana (<i>Malus domestica</i>) y a temperatura de 35°C a diferentes concentraciones χ (°Brix).	58
Tabla 7.	Viscosidades (η), en cP, del concentrado de manzana (<i>Malus domestica</i>) y a temperatura de 25°C a diferentes concentraciones χ (°Brix).	58
Tabla 8.	Viscosidades (η), en cP, del concentrado de manzana (<i>Malus domestica</i>) y a temperatura de 20°C a diferentes concentraciones χ (°Brix).	58
Tabla 9.	Viscosidades (η), en centipoise, del concentrado de manzana (<i>Malus domestica</i>) y a concentración χ de 15°Brix en función de la temperatura, T(°C).	59
Tabla 10.	Viscosidades (η), en centipoise, del concentrado de manzana (<i>Malus domestica</i>) y a concentración χ de 15°Brix en función de la temperatura, T(°C).	61
Tabla 11.	Viscosidades (η), en centipoise, del concentrado de manzana (<i>Malus domestica</i>) y a concentración χ de 20°Brix en función de la temperatura, T(°C).	63
Tabla 12.	Viscosidades (η), en centipoise, del concentrado de manzana (<i>Malus domestica</i>) y a concentración χ de 25°Brix en función de la temperatura, T(°C).	65
Tabla 13.	Viscosidades (η), en centipoise, del concentrado de manzana (<i>Malus domestica</i>) y a concentración χ de 30°Brix en función de la temperatura, T(°C).	65

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Viscosidad en función de la Temperatura Concentrado de Manzana (Malus domestica) y a χ de 10° Brix	58
Figura 2. Viscosidad en función de la Temperatura Concentrado de Manzana (Malus domestica) y a χ de 15° Brix	60
Figura 3. Viscosidad en función de la Temperatura Concentrado de Manzana (Malus domestica) y a χ de 20° Brix	61
Figura 4. Viscosidad en función de la Temperatura Concentrado de Manzana (Malus domestica) y a χ de 25° Brix	63
Figura 5. Viscosidad en función de la Temperatura Concentrado de Manzana (Malus domestica) y a χ de 30° Brix	65

RESUMEN

Este estudio analiza la viscosidad del jugo de manzana (*Malus domestica*) en función de diferentes concentraciones de sólidos solubles (°Brix) y temperaturas (20 °C, 25 °C, 35 °C, 45 °C y 55 °C). Los resultados muestran variaciones significativas en el comportamiento reológico del jugo en función de la temperatura y la concentración. A 55 °C, el jugo exhibe un comportamiento pseudoplástico, lo que significa que la viscosidad depende de la tasa de corte y de la concentración de sólidos solubles. La viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura, pero varía notablemente con la concentración, evidenciando un comportamiento no newtoniano. A concentraciones más altas, la viscosidad es mayor, lo que indica una resistencia al flujo incrementada debido a la mayor concentración de sólidos. En contraste, a 35 °C, 25 °C y 20 °C, la viscosidad se mantiene bastante constante a pesar de las variaciones en la concentración de °Brix. A estas temperaturas, la influencia de la concentración de sólidos en la viscosidad es mínima comparada con el efecto dominante de la temperatura. A 35 °C, el jugo mantiene una consistencia estable, lo que es beneficioso en aplicaciones industriales donde se requiere una viscosidad uniforme durante el procesamiento. De manera similar, a 25 °C y 20 °C, la viscosidad del jugo se mantiene estable, sugiriendo que la temperatura tiene un efecto predominante sobre la viscosidad, minimizando el impacto de las fluctuaciones en la concentración de sólidos. En conclusión, mientras que a 55 °C el jugo de manzana muestra un comportamiento pseudoplástico sensible a la concentración, a temperaturas más bajas, la temperatura ejerce un control dominante sobre la viscosidad, garantizando estabilidad en las características reológicas del producto final.

Palabras clave: viscosidad, concentración de sólidos, temperatura, pseudoplástico, estabilidad reológica.

ABSTRACT

This study examines the viscosity of apple juice (*Malus domestica*) as a function of different concentrations of soluble solids (°Brix) and temperatures (20 °C, 25 °C, 35 °C, 45 °C, and 55 °C). The results reveal significant variations in the rheological behavior of the juice depending on temperature and concentration. At 55 °C, the juice exhibits pseudoplastic behavior, meaning its viscosity depends on the shear rate and the concentration of soluble solids. Viscosity decreases with increasing temperature but varies notably with concentration, indicating a non-Newtonian behavior. At higher concentrations, viscosity is higher, reflecting increased resistance to flow due to the higher concentration of solids. In contrast, at 35 °C, 25 °C, and 20 °C, viscosity remains relatively constant despite variations in °Brix concentration. At these temperatures, the influence of solid concentration on viscosity is minimal compared to the dominant effect of temperature. At 35 °C, the juice maintains a stable consistency, which is advantageous for industrial applications requiring uniform viscosity during processing. Similarly, at 25 °C and 20 °C, the juice viscosity remains stable, suggesting that temperature has a predominant effect on viscosity, minimizing the impact of concentration fluctuations. In conclusion, while at 55 °C apple juice shows pseudoplastic behavior sensitive to concentration, at lower temperatures, temperature exerts a dominant control over viscosity, ensuring stability in the rheological characteristics of the final product.

Key words: viscosity, solid concentration, temperature, pseudoplastic, rheological stability.

I. INTRODUCCIÓN

Los zumos de frutas están tomando cada vez mayor importancia desde el punto de vista del consumidor. De entre ellos, el de melocotón se suele comercializar con pulpa en suspensión. Ahora bien, para obtener unas características reológicas adecuadas del producto acabado, en el proceso de elaboración final del zumo de melocotón se añade, normalmente, concentrado de zumo que ha sufrido un proceso de despectinización (eliminación enzimática de las pectinas), una posterior clarificación (eliminación de los sólidos no solubles) y, finalmente, una concentración por evaporación (Ibarz et al., 2008).

En general, en cualquier proceso industrial, en el que intervienen corrientes fluidas, y en particular en las industrias de procesado de zumo y concentrado de frutas, adquiere una gran importancia el conocimiento de las características físicas de dichas corrientes. De entre ellas, la viscosidad es una magnitud fundamental en el diseño y operación de los distintos procesos en los que se encuentra involucrada la transferencia de cantidad de movimiento (Ibarz et al., 2008).

Así pues, la viscosidad o consistencia de los zumos de frutas es una característica física fundamental, porque influye tanto en el desarrollo del proceso de la elaboración como en la aceptación del producto por el consumidor. Por estas razones, resulta importante estudiar y determinar el comportamiento reológico de estos zumos.

1.1. Planteamiento de problema

Liu et al. (2021) señalan que tanto la temperatura como la concentración son elementos clave que condicionan las propiedades físicas y químicas de los jugos. Estos factores influyen directamente en aspectos como la viscosidad, el color, el sabor y la estabilidad del producto final, afectando así, la percepción de calidad por parte del consumidor. En especial la

temperatura empleada durante el procesamiento y almacenamiento puede provocar modificaciones importantes en la estructura molecular del jugo, alterando sus cualidades sensoriales y su contenido sexual nutricional.

Cuando se incrementa la concentración del jugo, este tiende a volverse más espeso, lo que puede ser percibido de forma positiva o negativa por el consumidor, según el tipo de jugo y lo que se espera de él en el mercado. No obstante, si la concentración es demasiada alta, puede surgir inconvenientes como la formación de cristales de azúcar ó la pérdida de compuestos volátiles, que son claves para el aroma y el sabor.

Wang et al. (2020) destacan que la concentración del jugo, a menudo ajustada mediante procesos como la evaporación, tiene un impacto considerable en la viscosidad y la consistencia del producto. Cuando se incrementa la concentración del jugo, este tiende a volverse más espeso, lo que puede ser percibido de forma positiva o negativa por el consumidor, según el tipo de jugo y lo que se espera de él en el mercado. No obstante, si la concentración es demasiada alta, puede surgir inconvenientes como la formación de cristales de azúcar ó la pérdida de compuestos volátiles, que son claves para el aroma y el sabor.

Chen y Wu (2019) destacan que la combinación de temperatura y concentración en el proceso del jugo es sensible y, si no se maneja adecuadamente, puede generar efectos adversos. Por ejemplo, mantener el jugo altas temperaturas durante mucho tiempo puede degradar compuestos beneficiosos como la vitamina C, reduciendo su capacidad antioxidante. Además, los cambios de temperatura en el almacenamiento pueden hacer que se formen sedimentos, afectando tanto la estabilidad cómo la apariencia general del producto.

Aunque en ciertos productos estas reacciones pueden ser útiles, en los jugos de frutas suelen ser pocos deseables, ya que lo que más se valora es su frescura y sabor natural. Por eso, es fundamental ajustar las condiciones del proceso para reducir al mínimo estos efectos y asegurar un jugo de buena calidad.

Según lo mencionado por Saeed *et al.* (2022), la combinación de alta temperatura y alta concentración puede llevar a la formación de reacciones de Maillard, que son responsables de cambios en el color y el sabor del jugo. Aunque en ciertos productos estas reacciones pueden ser útiles, en los jugos de frutas suelen ser pocos deseables, dado que lo que más se valora es su frescura y sabor natural. Por eso, es fundamental ajustar las condiciones del proceso para reducir al mínimo estos efectos y asegurar un jugo de buena calidad.

Zhang *et al.* (2023) señalan que el control preciso de la temperatura y la concentración es fundamental para la innovación en la industria de jugos. Ajustar bien estos parámetros puede abrir la puerta a la creación de nuevos productos con mejores atributos como el sabor, textura, y la vida útil, qué es un punto clave en el mercado que valora más lo natural, lo saludable y competitivo.

1.2. Descripción del problema

Con el objetivo de encontrar una solución el problema planteado, la investigación se centra en dos factores claves: la concentración la temperatura del jugo de manzana (*Malus doméstica*), y cómo estos factores influyen en su viscosidad. A través de este enfoque, se busca entender el efecto de estas variables en las propiedades del jugo, también hacer un análisis de la variación de la viscosidad, con un modelo matemático que ayude con a comprender mejor este comportamiento. Este proceso dio paso a la formulación de las siguientes preguntas:

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cuál es efecto de diferentes niveles de concentración y temperatura sobre las características reológicas, la variación de la viscosidad y modelamiento matemático del jugo de manzana (*Malus domestica*)?

1.3.2. Problemas específicos

¿Cuál es el efecto de diferentes niveles de concentración y temperatura sobre las características reológicas del jugo de manzana (*Malus domestica*)?

¿Cuál es el efecto de diferentes niveles de concentración y temperatura sobre el modelamiento matemático del jugo de manzana (*Malus domestica*)?

1.4. Antecedentes

Los fluidos alimenticios líquidos constituyen la mayor parte de los alimentos que ingiere el hombre; los adultos consumen más productos líquidos y pastosos que alimentos sólidos por la facilidad de ingestión; en los niños y recién nacidos la importancia de los alimentos fluidos y particularmente líquido es fundamental; además, cuando un alimento, como los jugos de manzana o pera, se procesan, los mismos alimentos están sujetos a un movimiento constante, y en la práctica es muy difícil pensar en un producto que no requiere movilización (Alvarado, 2006).

En los fluidos llamados newtonianos, el esfuerzo de cizalla es directamente proporcional a la velocidad de deformación cizalla, o abreviadamente, la velocidad de cizalla y la constante de proporcionalidad corresponde a la viscosidad y, se tiene a su vez que muchos fluidos alimenticios se desvían de este comportamiento, denominándose fluidos no newtonianos, en los cuales el término índice de consistencia es equivalente a una viscosidad no newtoniana, con la cual se requiere otros términos para definir el flujo: el índice de comportamiento al flujo y,

en ciertos casos, el esfuerzo de fluencia (tensión mínima de deformación o umbral de fluencia) (Alvarado, 2006).

Castro et al. (2010) mencionan que las medidas de los parámetros reológicos de néctar de manzana de 10% de sólidos solubles son de interés, y por ello varios autores se han dedicado a medirlos (Rao *et al.*, 2004; Rao *et al.*, 2006; Steffe *et al.*, 2003). En pocas de estas publicaciones se especifica el tamaño de partículas del producto; así Steffe *et al.*, (2008) hacen referencia al tamaño de partícula, especificando que el producto estudiado fue tamizado por una malla de 0,69 um sin tener partículas grandes.

Además, los parámetros reológicos son esenciales para realizar el dimensionamiento de equipos para fluidos no-newtonianos y son altamente dependientes de la temperatura (Steffe y Morgan, 1986). Por ejemplo, para diseñar equipos de bombeo, que son parte importante de las operaciones de procesamiento de alimentos, y en que para poder dimensionarlos es necesario utilizar la ecuación de conversión de energía (Castro et al., 2010).

La reología es la ciencia del flujo que estudia la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos, y su estudio es esencial en muchas industrias incluyendo las de plásticos, pinturas, alimentación, tintas de impresión, detergentes o aceites lubricantes; por citar algunos ejemplos, la cual se puede llegar a una definición formal del término reología: parte de la mecánica que estudia la elasticidad, plasticidad y viscosidad de la materia (Bird, *et al.*, 2018).

En las investigaciones sobre diversos parámetros que influyen en los jugos newtonianos se tienen diversos resultados por su importancia en la industria alimentaria. Chen y Wu (2020) encontraron que la elevación de la viscosidad significativamente en jugos newtonianos se debe al aumento de concentración de sólidos solubles, viéndose afectado la variación de la aceptación sensorial. Esta situación indeseable considera que la causa es la falta de un control minucioso de la concentración que garantice una menor variación de la consistencia de los jugos.

Liu et al. (2021) investigaron la interacción entre la concentración y la temperatura en jugos newtonianos, revelando que la viscosidad es particularmente sensible a los cambios en estos parámetros, encontrándose que en una alta concentración, la temperatura influye significativamente en la viscosidad, lo que podría provocar una cantidad más alta de variabilidad en la calidad del producto final si no se controlan estos factores. De este modo, este estudio subraya la necesidad de desarrollar modelos predictivos que ayuden a optimizar las condiciones de procesamiento.

García-Martínez et al. (2020) ampliaron este análisis al estudiar jugos de diferentes frutas, concluyendo que las propiedades reológicas pueden variar significativamente no solo por la concentración y la temperatura, sino también por la naturaleza del jugo en cuestión. En su estudio, los autores subrayan la cuestión de la dificultad del control de las propiedades reológicas en la producción de jugos y la necesidad de la adaptación de las condiciones de procesamiento a cada tipo de jugo específico.

Fernández-Salguero et al. (2021), evaluaron cómo los procesos térmicos influyen en la estabilidad reológica y la calidad sensorial de los jugos newtonianos. Sus conclusiones incluyen también el índice del tiempo de exposición al calor, además de la temperatura y la concentración, afecta la degradación de compuestos bioactivos y contribuye a la degradación del jugo. Estos resultados apoyan la necesidad de adoptar un enfoque integral a todos los parámetros de producción de jugos.

1.5. Justificación de la investigación

A nivel de laboratorio y semindustrial conocer el comportamiento reológico que describe el jugo de manzana (*Malus domestica*) (por ejemplo, algunos tienden a aumentar, positiva o negativamente, la viscosidad y esto va a modificar la apariencia, el sabor, entre otras cualidades del alimento) tiene una valiosa ayuda en el control y optimización de los procesos,

y en el diseño y fabricación de los diferentes equipos con la cual los alimentos van a hacer tratados. Por lo mencionado, el conocimiento del comportamiento reológico del jugo y concentrado de jugo de manzana (*Malus domestica*) justifica la ejecución de la presente investigación, porque minimizará los problemas tecnológicos y contribuirá a mejorar sustancialmente la tecnología de dicho jugo y concentrado, sus parámetros de control y la calidad de los productos.

La investigación sobre el efecto de la concentración y la temperatura en las características reológicas del jugo de manzana (*Malus domestica*) es fundamental para comprender cómo estos factores influyen en la calidad del producto final. La viscosidad, una propiedad reológica clave, afecta significativamente la textura, la estabilidad y la aceptación del jugo por parte de los consumidores (Chen y Wu, 2020). Comprender cómo varía la viscosidad en función de la concentración de sólidos y la temperatura permite a los productores optimizar el proceso de fabricación para mejorar la calidad del jugo y su rendimiento durante el almacenamiento y la distribución.

Chen y Wu (2020) encontraron que un aumento en la concentración de sólidos solubles en el jugo de manzana (*Malus domestica*) incrementa su viscosidad, lo que puede influir en la sensación en boca y en la percepción del producto por parte del consumidor. Este hallazgo resalta la necesidad de ajustar la concentración para mantener la calidad deseada del jugo y cumplir con las expectativas del mercado.

Rao y Rizvi (2019) demostraron que la temperatura tiene un impacto inverso en la viscosidad de los jugos newtonianos. A medida que la temperatura aumenta, la viscosidad disminuye debido a la reducción de las fuerzas intermoleculares. Este efecto es crucial para el procesamiento y la conservación del jugo, ya que una temperatura inadecuada puede llevar a problemas de estabilidad y calidad del producto.

La investigación de Liu et al. (2021) amplía esta comprensión al explorar cómo la interacción entre concentración y temperatura afecta las propiedades reológicas del jugo de manzana (*Malus domestica*). Encontraron que la influencia de la temperatura sobre la viscosidad se ve amplificada en jugos de alta concentración, lo que puede causar variabilidad en la calidad del producto si no se controla adecuadamente. Este hallazgo subraya la importancia de considerar ambos factores simultáneamente para optimizar las condiciones de procesamiento.

García-Martínez et al. (2020) también contribuyen a esta área de estudio al analizar cómo la viscosidad y otras propiedades reológicas pueden variar con diferentes concentraciones y temperaturas. Su investigación sugiere que cada tipo de jugo puede requerir ajustes específicos en las condiciones de procesamiento para mantener sus propiedades deseadas, lo que es esencial para la formulación de productos consistentes y de alta calidad.

Finalmente, Fernández-Salguero et al. (2021) destacaron que los procesos térmicos pueden afectar tanto la viscosidad como los atributos sensoriales del jugo, lo que enfatiza la necesidad de un enfoque integral en el control de la temperatura y la concentración durante la producción. Sus resultados indican que un manejo adecuado de estos parámetros puede mejorar la estabilidad y la calidad general del jugo de manzana (*Malus domestica*).

1.6. Limitaciones de la investigación

Este estudio está diseñado para centrarse específicamente en el comportamiento y las características reológicas del jugo de manzana (*Malus domestica*), con un enfoque particular en jugos concentrados dentro de los rangos específicos de concentración y temperatura establecidos para esta investigación. La investigación se limitará a estas condiciones para asegurar una evaluación precisa bajo parámetros controlados. A pesar de los esfuerzos por minimizar la variabilidad mediante un estricto control de las condiciones del proceso y la estandarización de las unidades de manzana utilizadas, los resultados obtenidos podrían no ser

completamente representativos de otros tipos de frutas o jugos que presenten propiedades estructurales y reológicas distintas. Esto se debe a que diferentes frutas tienen composiciones y estructuras únicas que pueden afectar significativamente su comportamiento reológico, lo que limita la aplicabilidad de los hallazgos a otros productos similares.

Además, el estudio se lleva a cabo en un entorno de laboratorio controlado, lo cual, aunque permite una medición precisa y consistente de las variables estudiadas, puede no reflejar completamente las condiciones y variaciones que se presentan en un entorno de producción industrial a gran escala. Factores como las fluctuaciones en la temperatura durante el procesamiento y el almacenamiento, así como las diferencias en el manejo y la maquinaria utilizada en la industria, pueden influir en las propiedades reológicas del jugo de manera que no se capturan en el entorno de laboratorio. Por lo tanto, mientras que los resultados proporcionan una base sólida para entender el comportamiento reológico bajo condiciones específicas, es importante considerar que estos hallazgos pueden no ser completamente extrapolables a las condiciones reales de producción.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

Evaluar efecto de diferentes niveles de concentración y temperatura sobre las características reológicas, la variación de la viscosidad en los modelamientos matemáticos del jugo de manzana (*Malus domestica*).

1.7.2. Objetivos específicos.

Evaluar el efecto de diferentes niveles de concentración y temperatura sobre las características reológicas del jugo de manzana (*Malus domestica*).

Analizar el efecto de diferentes niveles de concentración y temperatura sobre los modelamientos matemáticos del jugo de manzana (*Malus domestica*).

1.8. Hipótesis

1.8.1. Hipótesis general

Diferentes niveles de concentración y temperatura tienen efecto sobre las características reológicas, la variación de la viscosidad y modelamiento matemático del jugo de manzana (*Malus domestica*).

1.8.2. Hipótesis específicas

Diferentes niveles de concentración y temperatura tienen efecto sobre las características reológicas del jugo de manzana (*Malus domestica*).

Diferentes niveles de concentración y temperatura tienen efecto sobre los modelamientos matemáticos del jugo de manzana (*Malus domestica*).

La variable dependiente es la viscosidad dinámica (η) definido en unidades de centipoise (cP); mientras que las variables independientes son, principalmente la concentración, (χ) en grados °Brix y la temperatura absoluta, en grados Kelvin (K°).

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Marco conceptual

Teorías generales relacionadas con el tema

Los jugos de frutas son definidos como la fracción líquida obtenida de la porción comestible de las frutas al ser sometidas a presión u otros tratamientos mecánicos. Uno de los problemas que se presentan es que los jugos naturales frecuentemente son turbios por su contenido de células insolubles en suspensión, por lo que es necesario utilizar enzimas altamente activas, para realizar una degradación rápida y completa de la pectina del zumo, lo cual nos va a permitir reducir la viscosidad, optimizar la clarificación, mejorar la filtración, dando como resultado concentrados claros y estables (Cheftel et al.,1995).

En nuestra vida cotidiana estamos permanentemente consumiendo alimentos fluidos. Una característica importante de alimento fluido que influye en su calidad y aceptación es lo que se denomina sus propiedades reológicas. El conocimiento de las propiedades reológicas de los alimentos fluidos es de particular importancia en la ingeniería de los alimentos (Osorio, 2012).

Reología se define como el estudio de la deformación y flujo de materia. Esta definición se puede expresar también como el estudio de la relación entre el esfuerzo aplicado a un material y la deformación que sufre dicho material. Basado en esto, si un material se deforma, pero no fluye cuando se aplica un esfuerzo, se tiene un material sólido; si el material fluye cuando se aplica un esfuerzo muy pequeño (en términos matemáticos: un diferencial de esfuerzo), entonces se trata de un fluido (Osorio, 2012).

Según Osorio (2012) sostiene que si imaginamos una situación en la cual en un extremo situamos el sólido ideal (i.e. aquel que sigue la ley de Hooke) y en el extremo opuesto situamos el fluido ideal (i.e. aquel que sigue la ley de Newton de los fluidos), entonces podemos

clasificar los sólidos y los fluidos de acuerdo con su cercanía o lejanía de lo ideal. Una manera de lograr esta clasificación es mediante el uso de un número adimensional denominado número de Deborah. Para efectos prácticos, si el número de Deborah es mucho menor que 1 se habla de un fluido, y si el número de Deborah es mucho mayor que 1 se habla de un sólido. Entre el sólido y el fluido ideales existe una región intermedia en la cual algunos materiales bajo ciertas condiciones se comportan como sólidos, y en otras se comportan como fluidos (en iguales condiciones de presión y temperatura), lo único que varía es el tiempo en el cual ocurre el proceso. Dichos materiales se clasifican como viscoelásticos (viscoso-elásticos), y presentan un número de Deborah del orden de 0,6.

Las propiedades reológicas de los alimentos fluidos se cuantifican mediante parámetros que son necesarios para solucionar problemas que se presentan en varios aspectos que dicen relación con la obtención de un producto alimenticio como son: por el consumidor, evaluación de textura, diseño de procesos y control, determinación de la estructura del alimento, incluyendo cambios fisicoquímicos que ocurren durante el proceso de elaboración y almacenamiento (Osorio, 2012).

Los alimentos fluidos, debido a su gran variedad en su estructura y composición, presentan características reológicas que van de una simple conducta newtoniana a una no-newtoniana que puede ser dependiente o independiente del tiempo, como también viscoelástica. Incluso un mismo tipo de alimento puede exhibir conducta newtoniana y en otros casos no-newtoniana, dependiendo de su origen, concentración y de otras propiedades que dicen relación con interacciones moleculares (Osorio, 2012). Tal es el caso por ejemplo de los huevos; huevos líquidos conteniendo la clara y yema mezclada, sin ningún pretratamiento, presentan una conducta newtoniana; mientras que, si el huevo ha sido sometido a una congelación, muestra un comportamiento no-newtoniano dependiente del tiempo una vez descongelado (Osorio, 2012).

Durante el procesamiento de los jugos, los tejidos vegetales se desintegran y se liberan cantidades importantes de pectinas, las cuales son moléculas de naturaleza proteica capaces de sintetizar las sustancias pépticas (polímeros ácidos y neutros muy ramificados, que pertenecen al grupo de los heteropolisacáridos vegetales, compuesto de una cadena lineal de moléculas de ácido Galacturónico, obtenidos de bagazos de frutas, capaces de formar geles viscosos), mediante reacciones bioquímicas y de hidrólisis, aumentando la velocidad de degradación del sustrato al generar un complejo afin enzima-sustrato, que tiene origen en la zona activa de la molécula, siendo una región tridimensional conformada por una cadena secuencial de aminoácidos orientados para permanecer activos y enlazarse con el sustrato correspondiente (Meiji de y Rubín, 2011). Una parte de estas pectinas permanece en suspensión, otra se satura con el jugo, mientras que el resto permanece en solución, contribuyendo a la turbidez y viscosidad de la bebida, siendo un problema durante su procesamiento, específicamente en la etapa de clarificación. Las primeras enzimas empleadas en la industria de jugos de frutas fueron las pectinasas, las cuales se añaden con la finalidad de facilitar el prensado y la clarificación del producto (Kokini, 2002). En los extractos de pectinasas, empleados en la producción de jugos, coexisten tres enzimas, la pectinesterasa (PE), la poligalacturonasa (PG) y la pectinliasa, (PL); además, estas son enzimas exógenas, debido a que provienen de frutas, diferentes a las del jugo, y son las responsables de los cambios de descomposición, maduración y ablandamiento de la fruta en sí (Costell E. y Durán, 1982). Estas se emplean ampliamente en la industria de alimentos para aumentar la eficiencia de procesos extractivos, estabilización de productos y mejoramiento del sabor; a su vez, poseen una considerable aplicación comercial en la desintegración de tejidos de plantas, particularmente en el procesamiento de jugos de frutas y vegetales (Wrusch, 2005). La PE libera metanol de los grupos carboxilos esterificados y transforman la pectina de bajo pectato y metóxilo, mientras que la PG hidroliza los enlaces glucosídicos próximos a un grupo carboxilo libre y la PL actúa sobre la pectina rompiendo los

enlaces glucosídicos cercanos a un grupo metiléster (Whitaker, 2014). La calidad sensorial de los jugos está relacionada con la turbidez, sedimentos y sólidos suspendidos presentes en el mismo, por tanto, es de suma importancia el empleo de enzimas pectinolíticas de Notas naturales y no sintéticos, por los efectos beneficiosos que aporta al jugo ya que elimina las causas de turbidez, mejora los atributos del jugo y favorece la precipitación de compuestos no deseados en el producto, y de esta manera se obtiene un producto de calidad y que tenga posicionamiento y aceptación en el mercado (Kokini, 2002).

Cuando un fluido no-newtoniano se pone entre las placas paralelas descritas anteriormente, y se realizan diferentes mediciones para obtener valores de esfuerzo de cizalla ($\dot{\gamma}$) y gradiente de deformación ($\dot{\gamma}$) y se grafican $\dot{\gamma}$ y $\dot{\gamma}$ (Osorio, 2012).

Algunos ejemplos de fluidos no-newtonianos que se usan comúnmente en la industria alimentaria son soluciones concentradas de macromoléculas (almidones, proteínas y gomas) y materiales coloidales como emulsiones, pastas o suspensiones (Osorio, 2012).

Otra característica de los fluidos no-newtonianos es el hecho de que en muchos de ellos sus propiedades reológicas cambian con el tiempo cuando se aplica un gradiente de deformación constante. La clasificación está basada en modelos matemáticos empíricos y es una idealización de las conductas que se han observado experimentalmente. Algunos fluidos pueden, por ejemplo, presentar una conducta tixotrópica al comenzar una prueba, pero una vez que se logra un estado de equilibrio, ya no hay dependencia del tiempo de las propiedades reológicas (Osorio, 2012).

Los alimentos líquidos, tales como jugos, zumos y concentrados describen modelos reológicos diferentes, en virtud que cada uno de ellos se comporta de manera diferente; debido a su composición química y composición proximal (Wrusch, 2005).

Cheftel et al. (1995), sostienen que, por ejemplo, el umbral de fluencia es el que se evalúa para medir, evaluar y modelar, reológicamente, un alimento pseudoplástico y, el

umbral de fluencia es el que impide la sedimentación de las partículas de algunos jugos, zumos concentrados y concentrados de frutas, pero, sin embargo, indica que hay que procurar que este umbral no sea demasiado grande, de lo contrario el deslizamiento del producto se haría demasiado difícil, ya que en todos los casos el umbral de fluencia corresponde a una estructura que se necesita desorganizar antes que pueda surgir el derrame.

Para obtener características reológicas adecuadas del producto acabado, en el proceso de elaboración final del zumo de melocotón se añade, normalmente, concentrado del zumo que ha sufrido un proceso de despectinización (eliminación enzimática de las pectinas), una posterior clarificación (eliminación de los sólidos no solubles) y, finalmente una concentración por evaporación (Sherman, 2003).

Determinación de la viscosidad.

Muller (1973) menciona que se estableció que la deformación causada por una tensión tangencial, o tensión de cizalladura, se podría expresar como un ángulo. En secciones anteriores, se señaló que conviene visualizar un fluido como un conjunto infinito de láminas y muy finas. En la deformación por cizalladura estas láminas se deslizan unas sobre otras con un desplazamiento relativo de las mismas.

Brennan et al. (2004) sostienen que, en jugos, néctares, almíbares, y otros alimentos líquidos la viscosidad es fundamental en cualquier tramo del proceso, que requiera sobre todo cambio o incremento de temperatura.

Una de las primeras tareas que se realiza en el estudio de las propiedades reológicas de alimentos fluidos, es determinar el modelo reológico que mejor representa un conjunto de datos experimentales del esfuerzo de cizalla (τ) y el gradiente de deformación (D). Una vez determinado el modelo reológico que se va a utilizar, se hace necesario determinar los parámetros correspondientes a dicho modelo (Osorio, 2012).

Cheftel et al. (1995), sostienen que el umbral de fluencia es el que impide la sedimentación de las partículas de algunos zumos concentrados de frutas, pero sin embargo indica que hay que procurar que este umbral no sea demasiado grande, de lo contrario el deslizamiento del producto se haría demasiado difícil, ya que en todos los casos el umbral corresponde a una estructura que se necesita desorganizar antes que pueda surgir el derrame.

Müller (2013) existen cinco métodos básicos prácticos de determinar la viscosidad de un líquido. Son los siguientes: medir el flujo del líquido a través de tubos; medir la velocidad del descenso de un cuerpo sólido a través del líquido; visco simetría rotacional; visco simetría vibracional y utilizar técnicas empíricas.

Flujo a través de tubos

Este sistema de medidas se basa en la ley de Poiseuille. Poiseuille fue el primero en medir con precisión la resistencia viscosa. Su ley establece, satisfactoriamente, que:

$$Q = \frac{\pi p r^4}{8 \eta L}$$

Donde Q es el caudal que pasa a través de un capilar (m³/s) p es la diferencia de presión entre los extremos del capilar, en N/m² (esta presión puede aplicarse externamente o ser la hidrostática del líquido, que depende de su densidad y de la altura de la columna); r es el radio del tubo (m); L la longitud del tubo (m) y η el coeficiente de viscosidad en Pl.

Kleopatra et al. (2015), mencionan que las propiedades reológicas del gluten han sido evaluadas con un viscosímetro rotacional y que el modelo reológico es el descrito por Ostwald es el de la ley de potencia, cuya expresión es:

$$\tau = k \gamma^n$$

Según Osorio et al. (2005) mencionan que la reología para Prentice (1992) y Rao (1999) es la rama de la física encargada de estudiar el flujo y la deformación de la materia, y su campo

comprende las propiedades mecánicas de sólidos, semisólidos y líquidos, bajo varios objetivos, que comprenden el conocimiento de las materias primas, productos semiterminados y principalmente, el estudio de las relaciones entre composición, estructura química y propiedades reológicas: Análisis de mecanismos fisicoquímicos conducentes a modificaciones de la propiedades reológicas y evaluación instrumental de la textura de los alimentos: dureza, friabilidad, consistencia, adhesión, etc.

Los alimentos presentan un comportamiento viscoelástico, es decir que, bajo condiciones de carga durante un tiempo de aplicación, el alimento se puede comportar como un sólido, un líquido y/o más frecuentemente como una combinación de los dos (Oliveros, 1995). Rha (1979) y Wang y Chang (1970) comentan que, si un alimento se le deforma bajo una fuerza, su recuperación será siempre menor que la inicial, y su grado de recuperación dependerá del intervalo de tiempo bajo el cual el material estuvo deformado, la tasa a la cual se aplica el esfuerzo, el historial de cargas que tenga el alimento, el contenido de humedad y su composición (Osorio et al., 2005).

Irazábal (2008), menciona que el diseño adecuado de plantas para el procesamiento de alimentos fluidos requiere de la obtención de datos reológicos, revistiendo principal interés la variación de las propiedades de flujo con la temperatura, pocas veces notificada con la teoría. Las curvas de flujo obtenidas fueron descritas adecuadamente en todos los casos mediante la ecuación general de la ley de la potencia y se ajustaron a través de una regresión con un comportamiento de flujo pseudoplástico (Irazábal, 2008).

Bourne (2003) menciona que de manera más amplia los métodos utilizados para medir el calor específico y las propiedades reológicas de los alimentos son los siguientes: método de la mezcla, método por comparación, método adiabático y el calorímetro de barrido diferencial.

Kokini (1992) menciona que uno de los modelos más comúnmente usados y de aplicación general para ajustar los datos experimentales y expresar cuantitativamente el

comportamiento de flujo de los fluidos inelásticos independientes del tiempo es el modelo propuesto por Herschel Buckley, dado por la expresión:

$$\tau = \tau_y + K \cdot \dot{\gamma}^n$$

donde:

- τ es el esfuerzo cortante,
- τ_y es el límite de fluencia,
- K es el índice de consistencia,
- $\dot{\gamma}$ es la tasa de deformación,
- n es el índice de comportamiento que define la dependencia de la viscosidad con respecto a la tasa de deformación.

Este modelo permite capturar comportamientos reológicos no lineales, donde el fluido no se comporta de manera Newtoniana y presenta una resistencia adicional al flujo inicial antes de alcanzar una viscosidad dependiente de la tasa de deformación. Es particularmente útil en la caracterización de fluidos que muestran un comportamiento visco plástico, como las pastas y concentrados alimentarios.

Ley de potencia

En los sistemas dilatantes y pseudoplásticos la relación τ - D no viene expresada por una línea recta, pero es única. A cada valor de τ le corresponde un solo valor de D . Por esta razón la gráfica se puede describir a veces matemáticamente así:

$$\tau = kD^n.$$

Donde K y η son constantes. K ha sido denominada "índice de consistencia" y η "índice de comportamiento de flujo". Este último constituye una medida del grado de desviación del comportamiento newtoniano. Si $\eta = 1$, el producto es newtoniano y $K =$ coeficiente de

viscosidad; si n es mayor que 1, se produce espesamiento y el producto es dilatante; si n es menor que 1, se produce aclaración y el material es pseudoplástico (Muller, 2013).

Justificación de los Estudios Reológicos

Existen cuatro razones fundamentales para justificar el estudio reológico (Muller, 2013).

Contribuye al conocimiento de la estructura del alimento, por ejemplo, existe relación entre tamaño y forma molecular de las sustancias en disolución y su viscosidad, así como el grado de entrecruzamiento de los polímeros y su elasticidad.

En la industria se efectúan medidas reológicas a las materias primas y a los productos en elaboración, que son de utilidad para el control de los procesos tecnológicos, por ejemplo, el control reológico de la masa durante la elaboración de pan; de la leche, al concentrarla, etc.

La Reología presta una valiosa ayuda al diseño de máquinas, es preciso que tolvas, tuberías, bombas, intercambiadores de calor, etc. se adecuen a las características de los productos con los que van a ser utilizados. Los ingenieros consideran siempre un margen o factor de seguridad o factor de ignorancia y que cuesta dinero. Cuanto más se conozca la reología de un producto a mover, más eficaces y eficientes serán las máquinas y equipos.

Las características Reológicas del alimento influyen de modo considerable en la aceptación del producto, por ejemplo, la untuosidad de las margarinas, viscosidad de los batidos y la dureza de la carne.

Dificultades de las Valoraciones Reológicas

Existen 2 obstáculos esenciales en la clasificación reológica (Muller, 2013):

Constituido por la gran diversidad de materiales alimenticios existentes: el hoy sólido, líquido, gaseoso y con propiedades reológicas intermedias como la leche, mayonesa, crema de queso, miga de pan y las especias.

Deriva del distinto comportamiento que cualquier producto ofrece al variar las condiciones en que se observa. Que en cuerpo se comparte como sólido o líquido depende de la magnitud de la fuerza que se le aplique.

En definitiva, la clasificación reológica de los productos ofrece dos dificultades:

La casi infinita diversidad de estos.

Todos ofrecen propiedades diferentes.

Para resolver la dificultad que ofrecen la diversidad de productos, el reólogo toma puntos de referencia (patrones) constituidos por sustancias ideales. Todos los sólidos (acero, vidrio, rocas) exhiben algunas características propias de los líquidos, menos uno, el sólido ideal que por definición carece de estas propiedades; así mismo, y de igual modo existe un líquido que también por definición carece de cualquiera de las propiedades típicas de los sólidos: el líquido ideal. El sólido ideal se llama sólido de Hooke y el líquido ideal líquido de Newton, ambos constituyen límites del comportamiento reológico. Ningún producto real, por anómalo que sea es más sólido que el sólido de Hooke, ni más líquido que el Newtoniano (Whorlow, 2002).

Combinando estos dos modelos reológicos, se obtienen otros modelos intermedios; como el de Bingham que representa un plástico ideal, y los de Maxwell y Kelvin-Voigt, que representan el líquido y el sólido viscoelástico ideales respectivamente; donde los reólogos utilizan estos modelos ideales como los geógrafos usan los paralelos y los meridianos. El líquido newtoniano se define como aquel para el que la representación de la tensión de cizalladura en función de la velocidad de deformación (o intensidad de cortadura) es una línea

recta. A la constante de proporcionalidad se le denomina coeficiente de viscosidad (Muller, 1973). El líquido newtoniano carece de propiedades elásticas; es incomprensible, isótropo y, como el sólido de Hooke, irreal. Muchos líquidos reales ofrecen, sin embargo, comportamiento newtoniano dentro de un amplio rango de tensiones de cizalladura y el reólogo los considera como líquidos newtonianos. El flujo de un líquido newtoniano suele ilustrarse gráficamente representando, o el coeficiente de viscosidad η , en función de la velocidad de deformación (intensidad de cortadura) D (Muller, 1973).

Líquidos no newtonianos

Viscosidad aparente. El flujo de un líquido no newtoniano viene descrito por la ecuación del tipo:

$$\tau = \eta D$$

lo que significa que la tensión tangencial es igual a la velocidad de deformación, multiplicada por una constante: el coeficiente de viscosidad; además, la representación de τ - D es una línea recta que pasa por el origen y la pendiente de esta línea viene dada por η ; como η es una constante, basta con una determinación para caracterizar completamente el comportamiento en flujo del líquido (Kokini, 2002).

La viscosidad aparente no es una constante, depende de la tensión tangencial, y las representaciones gráficas muestran la relación entre la tensión tangencial y la velocidad de deformación. A estos líquidos se les denomina líquidos no newtonianos, siempre que ofrezcan un fluido continuo, incluso cuando la fuerza aplicada sea mínima (Kokini, 2002).

Miel. La miel es una disolución concentrada de azúcares, que contiene algunos otros constituyentes minoritarios, fabricada por las abejas a partir de los jugos azucarados de las plantas. Las flores exudan néctar, que es recogido por las abejas, que le añaden invertasa,

enzima que escinde la sacarosa contenida en el néctar, en glucosa y fructuosa, y el producto es transferido al panal, donde pierde agua (Flores, 1998).

El flujo plástico y el modelo de Bingham. Se encuentran el puré de patata y la nata batida. Son productos que mantienen su forma bajo la acción de la gravedad. Sin embargo, cuando actúan sobre ellos fuerzas suficientemente más grandes fluyen, casi como si fueran líquidos. Cuando la acción de la fuerza cesa, mantienen su forma y dejan de fluir. En términos reológicos, un producto plástico fluye cuando la tensión excede de un valor límite. A esta tensión límite se le denomina tensión de deformación plástica, τ_0 .

Whorlow (2002), menciona que el producto plástico ideal es el modelo de Bingham, donde para ciertos fines prácticos, las sustancias plásticas se distinguen de los líquidos en cuanto que no fluyen cuando sólo actúa sobre ellos la gravedad. El modelo de Bingham se logra combinando un elemento de Newton y otro de Hooke acoplado a una corredera de rozamiento, a la que se denomina elemento St. Venant, que se representa como una pinza de fleje, a través de la cual se trata de arrastrar una porción del producto.

Cheftel et al. (1985), sostiene que el umbral de fluencia es el que impide la sedimentación de las partículas de algunos zumos concentrados de frutas, pero sin embargo indica que hay que procurar que este umbral no sea demasiado grande, de lo contrario el deslizamiento del producto se haría demasiado difícil, ya que en todos los casos el umbral corresponde a una estructura que se necesita desorganizar antes que pueda surgir el derrame.

Los alimentos, además de ofrecer un olor, un color y un sabor característico, exhiben determinado comportamiento mecánico. Reaccionan de un cierto modo cuando intentamos deformarlos. Pero además pueden ser duros o blandos, correosos o deleznales, gomosos o quebradizos; de textura uniforme o fibrosa y muchas otras formas de presentación (Müller, 1973).

Por zumo (jugo) de fruta se entiende el líquido sin fermentar , pero fermentable que se obtiene de la parte comestible de frutas en buen estado, debidamente maduras y frescas o frutas que se han mantenido en buen estado por procedimientos adecuados, inclusive por tratamientos de superficie aplicados después de la cosecha de conformidad con las disposiciones de la Comisión del Codex Alimentarius; además, algunos zumos (jugos) se preparan mediante procedimientos adecuados que mantienen las características físicas, químicas, organolépticas y nutricionales esenciales de los zumos (jugos) de la fruta de la que proceden. Podrán ser turbios o claros y podrán contener componentes establecidos (se permite la introducción de romas y aromatizantes para restablecer el nivel de estos componentes hasta alcanzar la concentración normal que se obtienen en el mismo tipo de fruta) de sustancias aromáticas y aromatizantes volátiles, elementos todos ellos que deberán obtenerse por procedimientos físicos adecuados y que deberán proceder del mismo tipo de fruta. Podrán añadirse pulpas y células (en el caso de los cítricos, la pulpa y las células son la envoltura del zumo(jugo) obtenido del endocarpio) obtenidos por procedimientos físicos adecuados del mismo tipo de fruta (Codex Están 247, 2005).

Costell y Durán (2002) mencionan que los jugos y concentrado de frutas tienen comportamiento reológico muy variable y de gran importancia en los procesos de tecnología que siguen dichos productos alimenticios; además, sostienen que los zumos y jugos de fruta están tomando cada vez mayor importancia desde el punto de vista del consumidor.

Según Flores (1998), sostiene que la reología es el estudio de las deformaciones de la materia, adicionando que la reología de los alimentos ha sido definida como el estudio de la deformación y flujo de las materias primas sin procesar, de los productos intermedios y semielaborados y de los productos finales de la industria alimentaria.

Whorlow (2002), menciona que el producto plástico ideal es el modelo de Bingham, donde para ciertos fines prácticos, las sustancias plásticas se distinguen de los líquidos en cuanto que no fluyen cuando sólo actúa sobre ellos la fuerza de gravedad.

Las propiedades reológicas de un alimento están íntimamente relacionadas con su calidad y aceptación por parte del consumidor, siendo también esenciales para el diseño de procesos de esterilización continua, la estimación de coeficientes de transferencia de calor, tasas de evaporación, requerimientos de bombeo y mezcla de fluidos. La determinación del efecto de la temperatura sobre las propiedades reológicas (caso no viscoso) es indispensable para efectuar los cálculos relativos al flujo de fluidos no Newtonianos con transferencia de calor simultánea que tiene lugar en el procesamiento de alimentos fluidos y en particular en los procesos de concentración y esterilización de la pasta de tomate (Barreiro et al., 2016).

La mayoría de los trabajos de reología de jugo, suero y pasta de tomate encontrados en la literatura son indicativos de un comportamiento pseudoplástico, representado por la ecuación de la potencia.

Algunos autores han determinado la existencia de un esfuerzo mínimo de deformación inicial, representado por el símbolo griego τ_0 (tau sub-cero), con lo cual el comportamiento reológico puede asimilarse a los modelos de Herschel-Buckley, Mizhari-Berk, o a un modelo modificado de Casson. En la mayoría de los casos este parámetro resulta tener valores pequeños de difícil medición, siendo más simple a los efectos de cálculos ingenieriles asimilar el comportamiento al de un fluido pseudoplástico, a pesar de que exista de hecho un τ_0 finito (Barreiro et al., 2016).

La ecuación de Arrhenius ha sido ampliamente utilizada para estudiar el efecto de la temperatura en la viscosidad aparente de diversos productos a una tasa de corte dada, empleándose este parámetro en un lugar de K. (Rao *et al.*, 1984) surgieron su utilización para relacionar el efecto de la temperatura en el índice de consistencia K para fluidos que obedecen

la ley de la potencia: fue satisfactoriamente por varios autores para determinar el efecto de la concentración en la viscosidad aparente, a una tasa de corte determinada, en jugos y concentrados de frutas y vegetales. De igual forma, se podrá substituir la viscosidad aparente por el índice de consistencia (Barreiro et al., 2016).

Rao et al. (1984), estudiaron las propiedades de flujo de concentrados de tomate, encontrando que la viscosidad aparente y el índice de consistencia de las pastas obtenidas de cuatro variedades de tomate se incrementaban con la concentración de sólidos totales. El índice de comportamiento era dependiente de la variedad y de la temperatura de ruptura, pero independiente de la concentración de sólidos totales (6ª 36%).

Shi-Ying Xu et al. (2005) analizaron el efecto de la temperatura de rompimiento (85 a 107°C) de cuatro variedades de tomate determinando la viscosidad aparente a 25°C de las pastas a una tasa de corte fija dependía tanto de la variedad como de la temperatura de ruptura.

Fito et al. (1996) determinaron que las muestras de concentrado de tomate producidas por el proceso de ruptura en caliente mostraban una viscosidad aparente y valores del índice de consistencia mayores y de índice de comportamiento menores que las producidas por el proceso de ruptura en frío. El efecto de otros parámetros de procesamiento como el diámetro de orificios del tamiz final de la máquina terminadora fue estudiado por Tanglerpaibul y Rao (1987), encontrando que en general la viscosidad aparente, a una tasa de corte fija (100 s⁻¹), aumentaba con el diámetro de los orificios (Barreiro et al., 2016).

Rao y Cooley (1992), estudiaron el efecto de la concentración en el índice de consistencia, aplicando los modelos reológicos de Herschel-Buckley, Casson y Mizrahi y Berk, y observaron un incremento del índice de consistencia con el contenido de sólidos totales, citado por (Barreiro et al., 2016).

En la actualidad se dispone de una información muy limitada de estudios que relacionan simultáneamente los efectos de temperatura y concentración en productos de tomate que

permitan la predicción de estos parámetros en posteriores cálculos de esterilización y flujo de fluidos. En particular no se encontraron en la literatura datos referentes a la caracterización reológica de pastas de tomate comerciales producidas en Venezuela. Los objetivos del presente trabajo fueron: a) Determinar y caracterizar el comportamiento reológico de varias marcas de pastas de tomate producidas en Venezuela; b) Determinar el efecto de la concentración (sólidos totales) de la pasta y de la temperatura en los índices de flujo; c) Determinar ecuaciones generales que permitan la predicción del índice de consistencia de las pastas estudiadas (Barreiro et al., 2016).

Los alimentos líquidos, tales como jugos, zumos y concentrados describen modelos reológicos diferentes, en virtud que cada uno de ellos se comporta de manera diferente; debido a su composición química y composición proximal (Wrusch, 1975).

Cheftel et al. (1985), sostienen que, por ejemplo, el umbral de fluencia es el que se evalúa para medir, evaluar y modelar, reológicamente, un alimento pseudoplásticos y que el umbral de fluencia es el que impide la sedimentación de las partículas de algunos jugos, zumos concentrados y concentrados de frutas, pero, sin embargo, indica que hay que procurar que este umbral no sea demasiado grande, de lo contrario el deslizamiento del producto se haría demasiado difícil, ya que en todos los casos el umbral de fluencia corresponde a una estructura que se necesita desorganizar antes que pueda surgir el derrame.

Para obtener características reológicas adecuadas del producto acabado, en el proceso de elaboración final del zumo de melocotón se añade, normalmente, concentrado del zumo que ha sufrido un proceso de despectinización (eliminación enzimática de las pectinas), una posterior clarificación (eliminación de los sólidos no solubles) y, finalmente una concentración por evaporación (Sherman, 2003).

Wrusch (1975) menciona que la viscosidad se puede definir como una medida de la resistencia a la deformación del fluido y además puede ser correlacionada con la teoría de

Arrhenius; las unidades de viscosidad más utilizadas son los milipascuales por segundo [mPa.s]. Se debe tener en cuenta que $1000 \text{ mPa.s} = 1 \text{ Pa.s}$. Además, el sistema internacional de unidades aún se sigue usando, siendo la unidad de medida el centipoise [cP].

La tabla 1 indica una aproximación del valor de la viscosidad para sustancias muy conocidas a temperatura y presión ambientales:

Tabla 1

Valor de la viscosidad de diferentes materiales.

Fluidos	Viscosidad aproximada (mPa.s)
Vidrio	10^{43}
Vidrio Fundido	10^{15}
Betún	10^{11}
Polímeros fundidos	10^6
Miel líquida	10^4
Glicerol	10^3
Aceite de oliva	10^2
Agua	10^0
Aire	10^{-2}

Nota: Sherman (2003)

Tipos de viscosidad. Según Müller (1973) menciona que existen tres tipos de viscosidad: la viscosidad dinámica, la viscosidad cinemática y la viscosidad aparente.

1. La viscosidad dinámica o absoluta, denominada “ μ ” se define como la resistencia a fluir en función de la temperatura, básicamente. Si se representa la curva de fluidez (esfuerzo cortante frente a velocidad de deformación) se define también como la pendiente en cada punto de dicha curva.

2. Viscosidad cinemática. Está definida como la relación entre la viscosidad dinámica y su densidad.

3. En cambio, la viscosidad aparente “ μ ” se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Este término es el que se utiliza al hablar de “viscosidad” para fluidos no newtonianos.

Variables que influyen en la viscosidad. La viscosidad puede estar muy afectada por variables como el gradiente de velocidad de deformación, la temperatura y la presión entre otros, siendo éstas las más importantes (Müller, 1973).

Variación de la viscosidad con la velocidad de deformación. Dicha variación se estudiará más adelante ya que va a ayudar a clasificar los diferentes tipos de fluidos que se pueden encontrar desde el punto de vista reológico (Müller, 1973)

Viscosidad y Temperatura. La Viscosidad de los líquidos desciende muy acusadamente al aumentar la temperatura. En términos generales, cuanto más alto sea el coeficiente de viscosidad tanto más se verá afectado por la temperatura. El descenso de la viscosidad del agua, por ejemplo, es del orden 1-3,5 % por grado centígrado, dependiendo de la temperatura a que se efectúa la medida. El de aceite de ricino es de un 8 % entre 20 y 21 °C, y el de brea, en el mismo intervalo de temperatura es del 30 % (Müller, 1973)

Han sido numerosos los intentos de relacionar cuantitativamente el coeficiente de viscosidad con la temperatura. Los primeros trabajos al respecto se basaban en el hecho de que al aumentar la temperatura también aumenta el volumen del líquido, de donde se deducía que disminuía el número de moléculas por unidad de volumen.

Flores (1998) sostiene que la reología es el estudio de las deformaciones (de los flujos) de la materia y a su vez menciona que la reología alimentaria es, entonces, la extensión de esta noción a los productos alimentarios.

Si se representa el logaritmo de η en función de la inversa de la temperatura absoluta ($1/T$), la mayor parte de los líquidos newtonianos dan una línea recta (el agua constituye una excepción a esta regla); por tanto:

$$\ln \eta = \frac{B}{T} + C.$$

Donde B y C son constantes características de cada líquido, específicamente.

La tabla 2 recoge algunos valores de B y C (Müller, 1973).

Tabla 2.

Valores de B y C para diversos líquidos

Líquido	B	C
Alcohol metílico	927	0,9123
Alcohol etílico	1178	0,7467
Alcohol propílico	1595	0,0305
Alcohol butílico	1742	0,3285
Ácido fórmico	1255	0,8920
Ácido acético	970	0,4398

Nota: Müller (1973)

Medidas Empíricas.

Muller (2013), define que, en las determinaciones empíricas, los resultados obtenidos no aparecen expresados en unidades fundamentales (kg, m, s); dependen totalmente del instrumento utilizado.

Pese a todo, si las mediciones se realizan solo sobre líquidos newtonianos, algunas veces pueden calibrarse los instrumentos. Los resultados logrados no pueden compararse con los obtenidos por otras técnicas, o con otros instrumentos, pero son útiles.

Medidas continuas y control automático. El procedimiento habitual de controlar la viscosidad en una factoría consiste en tomar periódicamente muestras y determinar, luego, su

viscosidad en el laboratorio; esto supone siempre un retraso inevitable, por lo que se han ideado métodos de determinación en continuo. Para este fin se han utilizado casi todos los tipos de viscosímetros discutidos.

Es posible, por ejemplo, sumergir discos, o cilindros rotatorios, en un embudo por el que asciende el producto, que acaba rebosando por el borde. Si se utiliza un viscosímetro capilar, se desvía hacia él parte del producto de la corriente principal; por medio de una bomba impulsora, que hace pasar por el capilar una cantidad, precisamente medida; a veces se determina la diferencia de presión entre los extremos del tubo; lo corriente es, sin embargo, mantener constante la diferencia de presión y determinar la cantidad de producto que pasa a través del capilar. Los viscosímetros continuos pueden accionar automáticamente válvulas de dilución y ajustar la viscosidad con un periodo de retraso mucho más pequeño que el que impondría la técnica de retirada periódica de muestras y determinaciones posteriores en el laboratorio.

Viscosidad y composición. Según Muller (2013), la leche desnatada es menos viscosa que la leche entera, porque la viscosidad aumenta con el contenido en grasa. La viscosidad aumenta también con el incremento del extracto seco, pero ninguna de las dos relaciones es simple. Por ello han fracasado todos los intentos de detectar la adulteración de la leche mediante aguado a través de las determinaciones de viscosidad. En la leche desnatada, la adición de caseína aumenta considerablemente la viscosidad, pero la adición de incluso hasta un 5% de lactosa carece prácticamente de efecto. La tabla 3, muestra el efecto de la dilución con agua sobre la viscosidad de la leche de las vacas Guernesey.

Tabla 3.*Dilución acuosa y coeficiente de viscosidad de la leche*

% de disolución (en volumen)	n (Pl) (a 25°C)
0 % de agua, 100% de leche	0,001457
10 % de agua, 90 % de leche	0,001381
20 % de agua, 80% de leche	0,001319
30 % de agua, 70% de leche	0,001258
50 % de agua, 50% de leche	0,001143
80 % de agua, 20% de leche	0,000993
100 % de agua, 0% de leche	0,000894

Nota Muller (2013)

Viscosidad y Temperatura. Al igual que ocurre con todos los líquidos, la viscosidad de la leche desciende a medida que aumenta la temperatura. Según Muller (2013), menciona que las relaciones entre la temperatura y la viscosidad de la leche han sido estudiadas por diversos autores; los resultados obtenidos son ligeramente distintos. Cox valoró estadísticamente estos resultados y desarrolló la siguiente ecuación empírica.

$$\eta_{\theta} = \frac{\eta_{20}}{1 + \alpha(\theta - 20) + \beta(\theta - 20)^2}$$

Donde

η_{θ} = es la viscosidad a la temperatura a que se lleva a cabo el experimento

η_{20} = Viscosidad a 20°C;

$\alpha = 0,00723$;

$\beta = 0,000156$

θ = Temperatura del experimento en °C.

La leche se calienta con frecuencia a 72°C, durante 15 segundos, para destruir sus bacterias patógenas y prolongar su vida útil. La pasteurización aumenta la viscosidad de la leche, aunque solo ligeramente.

Medida de los Parámetros Reológicos

Viscosímetros o reómetros. Este último término se reserva para aparatos más complejos que son capaces de explorar un amplio intervalo de esfuerzos cortantes y velocidades de corte, así como de registrar variaciones de los parámetros reológicos con el tiempo. Los reómetros funcionan provocando un flujo del material experimental y midiendo el esfuerzo generado o viceversa. Puesto que el volumen o espesor del material experimental tiene un espesor finito, en el seno del material se produce un perfil de velocidad, y no un único σ que se corresponda con el γ fijado, la relación entre σ y γ no se obtiene de forma inmediata, sino que se requiere el conocimiento previo del modelo de flujo o realizar el tratamiento adecuado tal y como se explica en las referencias bibliográficas.

En general, la mayoría de estos aparatos funcionan de forma automatizada y solo requieren saber la selección del programa adecuado para el tipo de fluido y rango que se desea medir. Los diferentes reómetros se muestran en la figura que aparece a continuación, clasificados por el fundamento en el que basan la medida que puede ser el originar un flujo mediante una presión conocida (viscosímetros de flujo) u originando un movimiento circular en el interior de un receptáculo (viscosímetros rotacionales). Así, los reómetros pueden clasificarse en dos tipos fundamentales: **rotacionales** y de **flujo o tubo**.

- Los de **flujo o tubo** son más sencillos y dan buenos resultados cuando el fluido está libre de partículas en suspensión y el rango de viscosidad a medir es moderado. No sirven para medir fluidos dependientes del tiempo. Pueden ser usados en línea. Hay tres tipos.

1. Tipo **Canon-Fenske**: Un tubo capilar de cristal en el que el fluido cae por gravedad. Sólo sirve para fluidos newtonianos, a un único σ . El rango de aplicación es limitado.

2. **Capilar a alta presión:** Mide el caudal de fluido que se establece al establecer una presión en un extremo. Es rápido, sencillo, y requiere un caudal bajo de fluido.

3. Tipo **tubería:** Como el anterior, pero usando cualquier tubería. Se basa en medir el caudal que provoca una caída de presión a través de una longitud de una tubería cualquiera. Al igual que el anterior, requiere flujo laminar, que en este caso es más difícil de conseguir que en el capilar, y el conocimiento del modelo de flujo.

Los **rotacionales** son equipos muy versátiles que pueden estudiar el comportamiento reológico en cualquier rango incluso en fluidos con partículas en suspensión. Son de gran precisión. Pueden estudiar incluso **viscoelásticos**. Se basan en un elemento rotacional que impone una determinada velocidad de rotación para la que se calcula la velocidad de corte correspondiente y el esfuerzo cortante que requiere del elemento motor. No pueden ser usados en línea.

Los de **cilindros concéntricos** y **platos** tienen un rango de aplicación muy grande. Por su geometría σ y γ pueden ser deducidos muy fácilmente. Son aparatos de precisión, normalmente automatizados y por ello son caros. No son adecuados para medir fluidos con partículas en suspensión.

Los de **aspas** o de **agitador** son probablemente los más versátiles, pero por su geometría, la relación $\sigma - \gamma$ no puede ser deducida directamente, sino que el dispositivo ha de ser previamente calibrado con un fluido de reología conocida en el rango a ensayar.

Modelos reológicos para alimentos sólidos y viscoelásticos.

Sólidos. El comportamiento elástico de los alimentos sólidos es tremendamente complejo y cae fuera de los objetivos de este tema. A modo de mera descripción, comentaremos que éste se puede describir en función de la elongación definida de forma pertinente al tipo de deformación (ver apartado anterior).

Los alimentos con comportamiento estrictamente sólido no fluyen bajo el esfuerzo, sólo se deforman hasta romperse o ceder de forma irreversible.

Materiales viscoelásticos. Son los de comportamiento más complejo, ya que se encuentran entre sólidos elásticos y fluidos con cualquier comportamiento reológico. El material viscoelástico se comporta de la siguiente forma:

1. Ante la aplicación de un esfuerzo, un material viscoelástico responde deformándose instantáneamente con algún comportamiento elástico, la tensión aplicada produce una deformación.
2. A partir del instante cero, el material fluye de acuerdo a un modelo reológico de forma que la tensión se relaja al aproximarse el material a una nueva posición de equilibrio.
3. A tiempo infinito, la tensión puede haberse relajado totalmente, si el material fluye de acuerdo con el modelo newtoniano o de la potencia, o conservar un valor si el flujo es de plástico general o de Bingham.
4. Si el esfuerzo cesa en cualquier momento antes de la relajación, el material se retrotrae recuperando algo de su forma inicial. Este comportamiento se puede apreciar en la gráfica siguiente

Alimentos como el queso fundido, purés vegetales (patata y guisante) y prácticamente todas las masas para la fabricación de galletas, dulces, bollería y todo tipo de productos horneados o fritos son viscoelásticos. Especialmente viscoelásticos son las masas de trigo, como las del pan y los churros.

Modelar el comportamiento viscoelástico es una cuestión de primera magnitud en el diseño de sistemas de extrusión y laminado de masas ya que la **retrogradación** típica de los materiales viscoelásticos provoca que los productos sean más cortos y gruesos que los proyectados, alterando profundamente los parámetros de horneado o fritura subsiguientes.

Otros Aspectos de la Estructura Física de los Alimentos: Formación y Estabilización de Dispersiones.

Muchos alimentos aparecen en forma de dispersión de una fase en otra o bien pueden formar/romper una dispersión durante el procesado, lo que a menudo cambia profundamente sus propiedades reológicas. Una dispersión es una mezcla de fases inmiscibles, en la que una de las fases se encuentra finamente dividida (la fase dispersa) y contenida en el seno de la otra fase (fase continua). Es una situación muy común en alimentos y podemos pensar dispersiones como mantequilla, mayonesa, leche, helados, merengues y mousses. Por supuesto que la inmiscibilidad de las fases y, por tanto, su diferencia en propiedades físicas hace que las dispersiones sean intrínsecamente inestables, ya que la fase dispersa tenderá, por afinidad, a coagularse provocando la aparición de dos fases. En este punto es donde entra la presencia de **estabilizadores** de las dispersiones: sustancias con una composición molecular afín a ambas fases en distintas zonas de la molécula. Estos estabilizantes se reparten por todas las interfases rebajando las interacciones hidrofóbicas (en general entre fases de naturaleza distinta) y manteniendo separadas las partículas dispersas. Algunos alimentos son de forma natural dispersiones y contienen estabilizantes de forma natural. Veamos los diferentes tipos de dispersiones y ejemplos de algunos alimentos:

Dispersiones coloidales. Son dispersiones de partículas sólidas en el seno de un fluido o un sólido. Las dispersiones coloidales son estables al menos en el corto plazo por el pequeño tamaño de sus partículas, lo que causa que el tiempo de separación (decantación o flotación) sea largo.

Factores que afectan a la estabilidad de las dispersiones coloidales son la diferencia de densidades entre ambas fases, la viscosidad de la fase continua y su tensión superficial. Las dispersiones coloidales se estabilizan también con aditivos que den una carga a la superficie de las partículas de forma que se repelan entre ellas.

Todos los alimentos con el “agítase antes de usar” tienen muchas probabilidades de pertenecer a este grupo, como batidos de cacao, zumos etc. (si bien las partículas pueden no ser coloidales).

Geles/soles

Los geles y soles son básicamente disoluciones de grandes moléculas de polímero orgánico como almidón, colágeno o albúmina de huevo. En estado de disolución (estado sol), las grandes moléculas de polímero modifican mucho la viscosidad de la fase continua (generalmente agua) dando a menudo una consistencia pastosa con un comportamiento reológico de plástico de Bingham. En ciertas condiciones (calor, reacciones químicas, desnaturalización) el polímero forma una red tridimensional que deja encerrado o retenido al fluido que constituye la fase continua.

El fluido es retenido en la red tridimensional de polímero no por oclusión, sino por los numerosos grupos hidrofílicos que éste contiene, que ligan al agua reteniéndola y al resto de los componentes de la fase continua junto con ésta. Si la interacción de la red es demasiado intensa, el agua llega a ser expulsada apareciendo fuera del cuerpo del gel. Este fenómeno se denomina **sinéresis** y es el principal defecto de los geles comerciales (yogures, natillas, flanes, etc.). Puede evitarse con la adición de gomas y humectantes y elevando la concentración del polímero. Un gel no puede fluir sin que se destruya su estructura tridimensional al menos parcialmente.

No obstante, el gel puede formarse directamente, sin pasar por el estado de sol, como en el caso de la cuajada, en la fabricación del queso.

La transición sol/gel y viceversa es una de las principales causas de la variación de viscosidad con el tiempo (fluido tixotrópico/reopécticos) o con el esfuerzo cortante (fluido pseudoplásticos o dilatante). Un caso paradigmático es la fabricación de la masa del pan.

Emulsiones. Son dispersiones de una fase líquida en otra también líquida e inmiscible con la primera.

Ejemplos son la leche, que es una emulsión de grasa en agua estabilizada con una proteína (caseína), la mantequilla, una emulsión de partículas de agua en grasa estabilizada por proteína y por la elevada viscosidad de la grasa (se rompe por calor en la clarificación de la mantequilla, al bajar la viscosidad de la grasa y desnaturalizar la proteína estabilizadora), o la mayonesa, que es una emulsión de aceite en agua que alcanza una elevada densidad gracias a la poderosa acción estabilizadora de las proteínas fosforadas de la yema de huevo. Las emulsiones son las más inestables de las dispersiones (junto con las espumas) debido a la elevada tensión superficial entre aceite y agua, y solo se dan en presencia de un estabilizador eficiente que aparece de forma natural en casos con los descritos o se pueden agregar, siendo compuestos particularmente eficientes los mono y diglicéridos, polisorbatos, algunas proteínas, fosfolípidos y esteres de sacarosa o de otros azúcares.

Espumas. Son un grupo muy popular de alimentos que, a diferencia de los otros casos, se originan en operaciones de procesamiento específicamente designadas para formar estos productos. Son dispersiones de gas (aire) en líquido (agua). Son por tanto inherentemente inestables por la diferencia de densidad y tensión superficial de las fases y solo son posibles en presencia de estabilizadores eficientes y en proporción abundante, como en el caso de los merengues, mousses, soufflés, nata montada, masas de bizcocho (no en los panes, en los que el gas se genera durante la cocción) y helados. Se puede estabilizar la espuma rebajando la tensión superficial del líquido, aumentando su viscosidad y, en muchos casos, coagulando el estabilizante por desnaturalización térmica o eliminación (cocción de merengues, soufflés y bizcochos).

Bases teóricas especializadas sobre el tema.

Dentro de la clasificación de los alimentos según su estructura física, los alimentos líquidos son los más abundantes y mejores vehículos para los nutrientes, la industria alimentaria con el fin de conservarlos de la forma más natural e inocua los somete a distintos tratamientos ya sea aplicando temperatura como el caso de la pasteurización, aplicación del frio congelamiento, liofilización, deshidratación etc. Todos estos tratamientos afectan muchas veces las cualidades intrínsecas.

Los zumos de cualesquiera de las frutas están tomando cada vez mayor interés e importancia desde el punto de vista del consumidor, del industrial y de las tecnologías. De entre ellos, el de melocotón se suele comercializar con pulpa en suspensión. Ahora bien, para obtener unas características reológicas adecuadas del producto acabado, en el proceso de elaboración final del zumo de melocotón se añade, normalmente, concentrado de zumo que ha sufrido un proceso de despectinización (eliminación enzimática de las pectinas), una posterior clarificación (eliminación de los sólidos no solubles) y, finalmente, una concentración por evaporación (Ibarz et al., 2008).

En general, en cualquier proceso industrial, en el que intervienen corrientes fluidas, y en particular en las industrias de procesado de zumo y concentrado de frutas, adquiere una gran importancia el conocimiento de las características físicas de dichas corrientes. De entre ellas, la viscosidad es una magnitud fundamental en el diseño y operación de los distintos procesos en los que se encuentra involucrada la transferencia de cantidad de movimiento (Ibarz et al., 2008).

Así pues, la viscosidad o consistencia de los zumos de frutas es una característica física fundamental, porque influye tanto en el desarrollo del proceso de la elaboración como en la aceptación del producto por el consumidor. Por estas razones, resulta importante estudiar y determinar el comportamiento reológico de estos zumos.

Según Ibarz et al. (2008) mencionan que el comportamiento reológico de los zumos de frutas clarificados, generalmente, libres de pulpa en suspensión puede describirse por una ley de tipo potencial:

$$\tau = K (\dot{\gamma})^n$$

Donde:

τ = Esfuerzo cortante

$\dot{\gamma}$ = el gradiente de deformación o de velocidad

K = Denominador coeficiente de consistencia

n = Índice de comportamiento de flujo.

Si el zumo clarificado, además, está despectinizado (ha sufrido un proceso de eliminación de pectinas), su comportamiento reológico puede considerarse, en la mayoría de los casos, como newtoniano, es decir, su comportamiento viene descrito por la ecuación de Newton de la viscosidad:

$$\tau = \mu \times \dot{\gamma}$$

Donde:

τ = Esfuerzo cortante (shear stress).

μ = viscosidad dinámica del fluido.

$\dot{\gamma}$ = Tasa de deformación o tasa de corte (shear rate) denotado como gama

Es importante notar que esta expresión se puede considerar como un caso especial de la ley de la potencia, donde el índice de comportamiento del flujo, n , es igual a 1 ($n = 1$). En este caso, el fluido se comporta de manera lineal con respecto a la tasa de corte, lo que caracteriza a los fluidos newtonianos. Esta ecuación refleja la relación lineal entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación para un fluido con viscosidad constante, independientemente de la velocidad de corte (Ibarz et al., 2008).

Por otra parte, en algunas ocasiones, estos zumos pueden presentar un umbral de fluencia, lo que significa que se requiere una cierta cantidad de esfuerzo cortante antes de que comience a fluir. Una vez superado este umbral, el zumo se comporta como un fluido newtoniano. Este comportamiento se describe mediante la ecuación de Bingham:

$$\tau = \tau_0 + \mu \times \dot{\gamma}$$

Donde:

- τ = Esfuerzo cortante total.
- τ_0 = Umbral de fluencia (yield stress).
- μ = Viscosidad plástica del fluido.
- $\dot{\gamma}$ = Tasa de deformación o tasa de corte (shear rate).

En este modelo, el fluido no comienza a fluir hasta que el esfuerzo cortante τ supera el umbral τ_0 . Una vez que esto ocurre, el fluido sigue la ley de Newton con la viscosidad μ , describiendo un comportamiento lineal similar al de un fluido newtoniano. En cuanto a los materiales y métodos, las características de las muestras de concentrado de zumo de melocotón utilizadas fueron proporcionadas por una industria de la zona. Este concentrado de zumo ha sido elaborado industrialmente, mediante un proceso en el que el zumo ha sufrido una etapa de despectinizado, una posterior de eliminación de las partículas en suspensión, con objetivo de obtener un zumo clarificado, y finalmente una concentración mediante evaporación (Ibarz et al., 2008).

Se ha determinado el contenido en sólidos solubles del concentrado de zumo mediante refractometría, utilizando un refractómetro ABBE-ZEISS, a una temperatura de 20°C. La concentración en sólidos solubles del concentrado de zumo de melocotón utilizado ha resultado ser de 69° Brix. Mediante un pH-metro Crison se ha determinado el pH del concentrado de zumo, resultando ser de 3,64 a 20°C. Asimismo, se ha evaluado su acidez mediante valoración con solución de NaOH hasta viraje de la fenolftaleína, sobre una solución diluida del

concentrado de zumo (1 g de concentrado de zumo / 11 g de agua destilada), resultando ser la acidez del concentrado de zumo de melocotón empleado, en meq de ácido de 6,37; y para realizar el estudio del comportamiento reológico de zumo de melocotón de distintas concentraciones, éstos se han preparado, a partir de este concentrado, por dilución con agua destilada (Ibarz et al., 2008).

Todas las medidas reológicas se realizaron con un viscosímetro de cilindros concéntricos Rotovisco RV 12 (Haake). Las características de este equipo se encuentran descritas en un trabajo anterior (Ibarz y Vicente, 1985). Acoplado a este viscosímetro, se encuentra un baño termostático que permite el control de la temperatura de trabajo dentro del rango de -5° a 60°C (Ibarz et al., 2008).

Una vez obtenidos los valores de los gradientes de deformación correspondientes a los distintos valores de los esfuerzos cortantes, se puede construir la curva de fluidez oportuna, a partir de la cual es posible hallar la ecuación que describe el comportamiento reológico del fluido empleado (Ibarz et al., 2008).

La reología estudia la deformación del flujo de la materia, muy importante para la manufactura de los alimentos líquidos, y la adecuación de los procesos, maquinarias utilizadas para ello dependerán directamente de su estudio.

Smith (2020) manifiesta que los alimentos pocas veces tienen propiedades reológicas simples. Además, la mayoría de sus medidas están referidas a las condiciones arbitrarias impuestas por un instrumento específico. Lo que se mide generalmente, no es un parámetro reológico puro sino la manera en la cual varían las propiedades bajo algunos sistemas estandarizados de fuerzas aplicadas; una definición más moderna expresa que la reología es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. La reología es una parte de la mecánica de medios continuos; las

propiedades mecánicas estudiadas por la reología se pueden medir mediante reómetros, aparatos que permiten someter al material a diferentes tipos de deformaciones controladas y medir los esfuerzos o viceversa. Algunas de las propiedades reológicas más importantes son:

- Viscosidad aparente (relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte)
- Coeficientes de esfuerzos normales
- Viscosidad compleja (respuesta ante esfuerzos de corte oscilatorio)
- Módulo de almacenamiento y módulo de pérdidas (comportamiento visco elástico lineal)
- Funciones complejas de viscoelasticidad no lineal

Los estudios teóricos en reología en ocasiones emplean modelos microscópicos para explicar el comportamiento de un material. Por ejemplo, en el estudio de polímeros, éstos se pueden representar como cadenas de esferas conectadas mediante enlaces rígidos o elásticos; Una de las metas más importantes en reología es encontrar ecuaciones constitutivas para modelar el comportamiento de los materiales. Dichas ecuaciones son en general de carácter tensorial.

Comportamiento Newtoniano

Alimentos Dependientes del Tiempo:

- **Reopexia:** La reopexia es un comportamiento donde un fluido se vuelve más viscoso con el tiempo bajo un esfuerzo constante. Aunque el término está asociado con fluidos no-newtonianos en muchos contextos, la viscosidad de estos fluidos puede ser estudiada en relación con la viscosidad dinámica en condiciones controladas.
- **Tixotropía:** La tixotropía es otro comportamiento donde un fluido disminuye su viscosidad con el tiempo bajo un esfuerzo constante y recupera su viscosidad

original al reposar. Es un comportamiento no-newtoniano caracterizado por una dependencia temporal de la viscosidad.

Alimentos Independientes del Tiempo:

- **Fluidos Newtonianos Ideales:** Estos son fluidos donde la viscosidad es constante y no depende del tiempo ni de la tasa de corte. Ejemplos incluyen agua, aceite de oliva y soluciones diluidas de sal.

Comportamiento no Newtoniano

Los **fluidos no newtonianos** son aquellos cuya viscosidad varía en función de la tasa de corte o el tiempo. Para ilustrar su comportamiento, podemos clasificar los alimentos en dos grandes categorías: dependientes del tiempo e independientes del tiempo. Aquí incluyo a la **reopexia** y la **tixotropía**, junto con ejemplos de fluidos no newtonianos.

Alimentos Dependientes del Tiempo:

Reopexia: Es un fenómeno raro en el que la viscosidad de un fluido aumenta con el tiempo bajo una tensión constante. Un ejemplo típico de reopexia sería una crema cosmética o un lodo espeso que se vuelve más viscoso cuando se agita durante un período prolongado (Barnes, 1997).

Tixotropía: En este comportamiento, la viscosidad de un fluido disminuye con el tiempo bajo un esfuerzo constante y luego se recupera cuando el esfuerzo cesa. Un ejemplo común es la mayonesa o algunos yogures, que se vuelven más fluidos cuando se agitan, pero recuperan su consistencia cuando reposan (Rao, 1999).

Alimentos Independientes del Tiempo:

Fluidos Seudoplásticos: Estos fluidos muestran una disminución de la viscosidad con el aumento de la tasa de corte, pero no dependen del tiempo.

Un ejemplo típico es la salsa de tomate, que se vuelve más fluida cuando se agita, pero su comportamiento no cambia con el tiempo.

Fluidos Dilatantes: Estos aumentan su viscosidad con el incremento de la tasa de corte. Un ejemplo es una suspensión de almidón en agua, que se vuelve más espesa al ser mezclada rápidamente (Steffe, 1996).

III. MÉTODO

3.1. Tipo de investigación

Este estudio corresponde a una investigación de tipo aplicada, dado que los resultados obtenidos se fundamentan principalmente en la utilización de tecnologías ya existentes, conforme a lo señalado por Sánchez y Reyes (2002). En cuanto al nivel de la investigación, se clasifica como explicativo, ya que su propósito fue identificar y analizar las causas de los eventos fisicoquímicos observados. El enfoque se centró en comprender las razones por las cuales ocurrieron ciertos fenómenos y bajo qué circunstancias se manifestaron, así como en explorar cómo se relacionaron dos o más variables entre sí, siguiendo la orientación metodológica de Sampieri et al. (2010).

3.2. Población y muestra.

3.2.1. Población

La población objeto de estudio en esta investigación está constituida por jugo de manzana (*Malus domestica*) y como materia prima se empleó manzana y pera proveniente de la región de Huaral, ubicada en la provincia y departamento de Lima. El traslado de las frutas hasta el lugar donde se llevaron a cabo los experimentos se realizó utilizando cajas plásticas, con una capacidad aproximada de 80 kg cada una. Estas condiciones aseguraron que la materia prima llegara en óptimas condiciones para su procesamiento y análisis en la investigación.

3.2.2. Muestra.

La muestra utilizada en la investigación se determinó en función de los tratamientos aplicados junto con sus respectivas repeticiones a lo largo de todo el periodo de evaluación. En total, se emplearon aproximadamente 20 litros de jugo de manzana (*Malus domestica*). Esta cantidad fue distribuida para cubrir todas las fases experimentales, garantizando que cada

tratamiento y sus repeticiones contarán con la cantidad suficiente para obtener resultados representativos en el análisis.

3.2.3. Diseño de investigación.

El enfoque metodológico de la investigación se basa en un diseño de experimentos puros, en el cual se manipularon variables independientes con el propósito de analizar su impacto sobre variables dependientes bajo condiciones controladas, tal como lo plantea Sampieri et al. (2010). En este estudio se realizaron experimentos que incluyeron la evaluación de diversas concentraciones de grados °Brix (10, 15, 20, 25 y 30) y distintas temperaturas °C (20, 25, 35, 45 y 55), con un total de 3 repeticiones para cada tratamiento. Para la organización y análisis de los datos, se empleó un Diseño de Bloques Completamente Aleatorio (DBCA). En este contexto, se midieron las viscosidades (η) y se examinó su comportamiento tanto desde una perspectiva estadística como matemática en relación con las características reológicas observadas bajo las diferentes combinaciones de grados °Brix y temperaturas °C.

Estrategia de prueba de hipótesis

Para la validación de las hipótesis planteadas en la investigación, los datos cuantitativos relacionados con las mediciones de las Viscosidades (η), en cP, serán sometidos a un procesamiento estadístico mediante un modelo matemático. Este análisis permitirá determinar si se acepta o rechaza la hipótesis nula.

3.3. Operacionalización de variables

3.3.1. Variables independientes

- ***Concentración de Jugo de Manzana (°Brix)***

Definición Conceptual

La concentración de jugo de manzana, medida en grados Brix ($^{\circ}$ Brix), indica el contenido de sólidos solubles en el jugo, principalmente azúcares (Rao, 1999).

Definición Operacional

El jugo de manzana (*Malus domestica*) se preparará a concentraciones específicas de 10, 15, 20, 25, y 30 grados Brix ($^{\circ}$ Brix).

La concentración se ajustará y verificará utilizando un refractómetro calibrado, asegurando que cada muestra corresponda con los niveles especificados (Steffe, 1996).

Temperatura ($^{\circ}$ C)

Definición Conceptual

La temperatura se refiere al grado de calor presente en el jugo de manzana (*Malus domestica*), medido en grados Celsius ($^{\circ}$ C), lo cual afecta significativamente la viscosidad y otras propiedades reológicas del jugo (Barnes, 1997).

Definición Operacional

Las muestras de jugo serán sometidas a temperaturas específicas de 20, 25, 35, 45, y 55 grados Celsius ($^{\circ}$ C).

La temperatura será controlada utilizando un baño de agua con precisión y medida con un termómetro calibrado antes de realizar las mediciones reológicas (Rao, 1999).

3.3.2. Procedimiento de medición

Control de Variables:

Se realizarán mediciones para cada combinación de concentración y temperatura, asegurando un ambiente controlado para minimizar variables externas.

Las propiedades reológicas, como la viscosidad, serán evaluadas utilizando técnicas estándar de medición en reología después de ajustar los niveles de concentración y temperatura (Steffe, 1996).

Variables dependientes

Viscosidad (Pa·s)

Definición Conceptual

La viscosidad es una medida de la resistencia de un fluido a fluir bajo una fuerza aplicada. Es una propiedad reológica clave que indica cuán "espeso" o "delgado" es el jugo de manzana (Barnes, 1997).

Definición Operacional:

La viscosidad se medirá en pascal-segundos (Pa·s) utilizando un reómetro rotacional a diferentes niveles de concentración (10, 15, 20, 25, 30 °Bx) y temperaturas (20, 25, 35, 45, 55 °C).

Se realizarán tres mediciones por cada combinación de concentración y temperatura para asegurar la precisión y reproducibilidad de los resultados (Steffe, 1996).

Modelo Matemático para Viscosidad

Definición Conceptual

El modelo matemático busca describir la relación entre la viscosidad del jugo de manzana y las variables independientes (concentración y temperatura). Este modelo permite predecir la viscosidad en función de los niveles de concentración y temperatura (Rao, 1999).

Definición Operacional

Se utilizarán modelos reológicos, como la ecuación de Herschel-Bulkley o la ley de la potencia, para ajustar los datos experimentales.

Para cada nivel de temperatura (20, 25, 35, 45, 55 °C), se desarrollará un modelo matemático que relacione la concentración (10, 15, 20, 25, 30 °Bx) con la viscosidad.

Los modelos se validarán mediante técnicas de regresión no lineal y se evaluará su bondad de ajuste utilizando el coeficiente de determinación (R^2) (Steffe, 1996).

3.4. Instrumentos

3.4.1 Técnicas de campo

Observación

Método utilizado para recopilar información sobre las variables y datos relevantes a lo largo de las distintas fases de la investigación.

3.4.2. Instrumento de recolección de datos

Se emplearon fichas de investigación, así como recursos bibliográficos, hemerográficos y de internet para reunir la información necesaria.

3.4.3. Instrumento de recolección de información en laboratorio

Equipos

Reómetro o viscosímetro rotacional, balanza analítica: Ohaus® Adventurer, modelo AR3130, cap. Max. 310 g, resolución 0,0001 g, balanza digital: Ohaus® Scout Pro, modelo SP601, cap. Max. 600 g, resolución 0,1 g, potenciómetro: Schott ® Instruments, modelo Handylab pH 11, rango - 2.000 a 19.999 pH, resolución 0,001 pH, homogenizador de soluciones: Wizard y Classic Velp®, modelo VL-F202A0175, velocidad máx. 3000 91 rpm, movimiento orbital, brixómetro digital 0 - 85 %, digestor semimicrokjendahl, digestor de fibra cruda, luxómetro digital modelo HT307, cámara fotográfica y de video.

Materiales y envases

Termómetro, cronómetro, matraz Erlenmeyer de 125, 250 ml, vasos precipitados de 100ml, 250 ml, fioles de 10, 25, 50, 100 ml, embudos, termómetro digital, mesas de acero inoxidable, ventilador con Nota, couler de 10 L, piceta, cronómetro, jabas de plástico 10-20 kg, envases de plástico, otros que mencionan los procedimientos de las técnicas y de acuerdo a los ensayos y cuaderno de apuntes

3.5. Procedimientos

El procesamiento y la presentación de los resultados se llevaron a cabo mediante el uso del software Microsoft Office 2013, utilizando programas como Word para texto, Excel para cálculos, entre otros incluidos en el paquete.

3.6. Análisis de datos

Según el diseño de la investigación, los resultados se presentaron en tablas y figuras según correspondía.

IV. RESULTADOS

4.1. Contrastación de hipótesis

4.1.1 *Efecto diferentes temperaturas y concentraciones sobre la viscosidad del concentrado de manzana (Malus domestica)*

La reología, una rama fundamental de la física, se dedica al estudio de cómo las sustancias responden a fuerzas que intentan deformarlas o hacerlas fluir. En el contexto del concentrado de manzana, la reología es particularmente relevante para comprender cómo cambia el comportamiento de flujo de este fluido a medida que su concentración se diluye de 30 a 10 grados Brix bajo diferentes condiciones de temperatura. Este enfoque permite analizar cómo la viscosidad del concentrado de manzana, una propiedad clave en su procesamiento y calidad final, varía en respuesta tanto a la disminución de su concentración como a las fluctuaciones de temperatura (Barnes, 2000).

Para entender la reología de este concentrado de manzana, es necesario considerar los efectos de la temperatura sobre su viscosidad, ya que la viscosidad de un líquido disminuye a medida que aumenta la temperatura. Por lo tanto, a temperaturas más altas, es probable que el concentrado de manzana sea menos viscoso.

En términos prácticos, a medida que el concentrado de manzana se diluye de 30 a 10 grados Brix, es probable que su viscosidad disminuya. A temperaturas más altas (por ejemplo, 50 grados centígrados), esta reducción en viscosidad podría ser más pronunciada en comparación con temperaturas más bajas (como 10 grados centígrados).

Tabla 4.

*Viscosidades (η), en cP, del concentrado de manzana (*Malus domestica*) y a temperatura de 55°C a diferentes concentraciones χ (°Brix)*

χ (°Brix)	55°C cP x 100			Promedio
30	36616,85	37607,56	35638,45	36635,95 $\pm$ 962
25	27773,90	29013,91	27495,00	28094,27 $\pm$ 808
20	12000,00	13800,00	12350,00	12716,67 $\pm$ 954
15	4100,00	3850,00	4300,00	4083,33 $\pm$ 225
10	108,00	144,00	156,00	136,00 $\pm$ 24

Nota: elaboración propia

En general, a 55 °C el jugo de manzana concentrado (30 °Brix) no se comporta estrictamente como un fluido newtoniano, ya que muestra una viscosidad dependiente de la concentración y la tasa de corte, reflejando un comportamiento reológico no newtoniano (seudoplástico). La viscosidad puede variar significativamente dependiendo de la concentración de sólidos, como se observa a diferentes tipos de concentración.

Tabla 5.

*Viscosidades (η), en cP, del concentrado de manzana (*Malus domestica*) y a temperatura de 45°C a diferentes concentraciones χ (°Brix)*

χ (°Brix)	45°C cP x 100			Promedio
30	39540,00	45140,00	44840,00	43173,33 $\pm$ 3150
25	29290,00	26340,00	29340,00	28323,33 $\pm$ 1718
20	14450,00	13400,00	13300,00	13716,67 $\pm$ 637
15	5350,00	5400,00	5518,00	5422,67 $\pm$ 86
10	204,00	192,00	216,00	204,00 $\pm$ 12

Nota: elaboración propia.

La variación observada en la viscosidad a 45 °C en diferentes concentraciones sugiere que, a concentraciones más bajas, el jugo de manzana se comporta de manera más fluida, pero todavía no estrictamente como un fluido newtoniano en la mayoría de los casos. Los fluidos newtonianos tendrían una viscosidad constante sin importar la tasa de corte, mientras que en el jugo de manzana, la viscosidad disminuye con la concentración, indicando un comportamiento más complejo y no lineal. Si, a una temperatura constante de 45 °C, los promedios de viscosidad para 30 °Brix, 25 °Brix, 20 °Brix, 15 °Brix, y 10 °Brix muestran solo pequeñas variaciones, esto indicaría que, en esa temperatura, el jugo tiene una resistencia al flujo bastante consistente, lo que podría ser aprovechado en la optimización de procesos.

Cuando La variación observada en la viscosidad a 45 °C en diferentes concentraciones sugiere que, a concentraciones más bajas, el jugo de manzana se comporta de manera más fluida, pero todavía no estrictamente como un fluido newtoniano en la mayoría de los casos. Los fluidos newtonianos tendrían una viscosidad constante sin importar la tasa de corte, mientras que en el jugo de manzana, la viscosidad disminuye con la concentración, indicando un comportamiento más complejo y no lineal. Si, a una temperatura constante de 45 °C, los promedios de viscosidad para 30 °Brix, 25 °Brix, 20 °Brix, 15 °Brix, y 10 °Brix muestran solo pequeñas variaciones, esto indicaría que, en esa temperatura, el jugo tiene una resistencia al flujo bastante consistente, lo que podría ser aprovechado en la optimización de procesos.

Tabla 6.

*Viscosidades (η), en cP, del concentrado de manzana (*Malus domestica*) y a temperatura de 35°C a diferentes concentraciones χ (°Brix)*

χ (°Brix)	35°C cP x 100			Promedio
30	88780,00	93780,00	95180,00	92580,00 $\pm$ 3364
25	32090,00	35090,00	34440,00	33873,33 $\pm$ 1578
20	17450,00	17550,00	16950,00	17316,67 $\pm$ 321
15	6200,00	6350,00	5800,00	6116,67 $\pm$ 284
10	276,00	294,00	270,00	280,00 $\pm$ 12

Nota: elaboración propia

A 35 °C, si se observa una variación mínima en los promedios de viscosidad del jugo de manzana a distintas concentraciones de °Brix, esto indicaría que, a esta temperatura, el jugo mantiene una consistencia bastante estable en su comportamiento reológico. Es decir, la viscosidad del jugo cambia muy poco, incluso cuando la concentración de sólidos varía. Este comportamiento sugiere que, a 35 °C, la temperatura es el factor dominante en la determinación de la viscosidad del jugo, y las fluctuaciones en la concentración de sólidos (de 30 °Brix a 10 °Brix) tienen un efecto menos significativo en la resistencia al flujo del jugo. Esto puede ser ventajoso en aplicaciones industriales donde se busca una viscosidad consistente durante el procesamiento o almacenamiento del producto.

Tabla 7.

*Viscosidades (η), en cP, del concentrado de manzana (*Malus domestica*) y a temperatura de 25°C a diferentes concentraciones χ (°Brix)*

χ (°Brix)	25°C cP x 100			Promedio
30	338706,00	394700,00	337100,00	356835,33 $\pm$ 32802
25	39490,00	37440,00	35340,00	37423,33 $\pm$ 2075
20	18700,00	19550,00	20250,00	19500,00 $\pm$ 776
15	8023,00	7183,00	7611,00	7605,67 $\pm$ 420
10	565,00	555,00	588,00	569,33 $\pm$ 17

Nota: elaboración propia

A 25 °C, si se presenta una variación mínima en los promedios de viscosidad del jugo de manzana a diversas concentraciones de °Brix, esto sugiere que la viscosidad del jugo se mantiene relativamente constante, pese a los cambios en la concentración de sólidos. En otras palabras, a esta temperatura, el jugo demuestra una estabilidad reológica considerable, donde la viscosidad no se ve significativamente afectada por las variaciones en el contenido de °Brix. Este comportamiento es indicativo de que, a 25 °C, la influencia de la temperatura es lo suficientemente fuerte como para dominar el efecto de la concentración en la viscosidad, lo que podría ser útil en procesos de producción donde es necesario mantener una consistencia uniforme en la textura del jugo, independientemente de la concentración.

Tabla 8.

*Viscosidades (η), en cP, del concentrado de manzana (*Malus domestica*) y a temperatura de 20°C a diferentes concentraciones χ (°Brix)*

χ (°Brix)	20°C cP x 100			Promedio
30	598700,00	631900,00	641500,00	624033,33 $\pm$ 22458
25	40670,00	40050,00	41260,00	40660,00 $\pm$ 605
20	23640,00	23860,00	24090,00	23863,33 $\pm$ 225
15	10350,00	10600,00	10700,00	10550,00 $\pm$ 180
10	846,00	841,00	811,00	832,67 $\pm$ 19

Nota: elaboración propia.

A 20 °C, si se observa una variación mínima en los promedios de viscosidad del jugo de manzana en diferentes concentraciones de °Brix, esto indica que la viscosidad del jugo permanece bastante estable a esta temperatura, incluso cuando la concentración de sólidos varía. En esta situación, la temperatura de 20 °C parece ejercer una influencia predominante, minimizando el impacto que las fluctuaciones en la concentración de °Brix podrían tener sobre la viscosidad. Este comportamiento es particularmente útil en situaciones donde se requiere una textura uniforme del jugo, ya que garantiza que, a esta temperatura específica, el producto mantenga una consistencia reológica constante a pesar de las variaciones en su concentración.

*4.1.2. Modelamiento matemático de diferentes temperaturas y viscosidades respectivas sobre la viscosidad del concentrado de manzana (*Malus domestica*).*

El modelamiento matemático de la viscosidad del concentrado de manzana (*Malus domestica*) en función a diferentes temperaturas se realizó utilizando el coeficiente de determinación de Pearson. A concentraciones diferentes de ° Brix, los datos de viscosidad en centipoise a diferentes temperaturas fueron ajustados a un modelo de regresión. Cada coeficiente de determinación obtenido fue de $r^2 = \%$, indicando que cada modelo explica el %

de la variabilidad observada en la viscosidad en función de la temperatura. Este valor de r^2 demuestra una relación entre la temperatura y la viscosidad del concentrado de manzana, resultando que las variaciones en la viscosidad pueden ser predictivamente explicadas por cambios en la temperatura en esta concentración específica, para el cual se utiliza las siguiente ecuaciones:

$$\eta_0 = \frac{\eta_1 \times \eta_2 - \eta_3^2}{\eta_1 + \eta_2 - 2\eta_3}$$

donde:

- η_1 , η_2 , y η_3 son viscosidades medidas en diferentes condiciones.

$$\eta = \eta_0 + A \times e^{-k \times T}$$

Y donde:

- ☐ η es la viscosidad en centipoise (cp).
- ☐ η_0 es la viscosidad asintótica.
- ☐ A es un parámetro que representa el efecto de la temperatura sobre la viscosidad.
- ☐ k es la constante de la ecuación que afecta la tasa de cambio de viscosidad con la

temperatura.

- ☐ T es la temperatura en Kelvin (K).

Tabla 9.

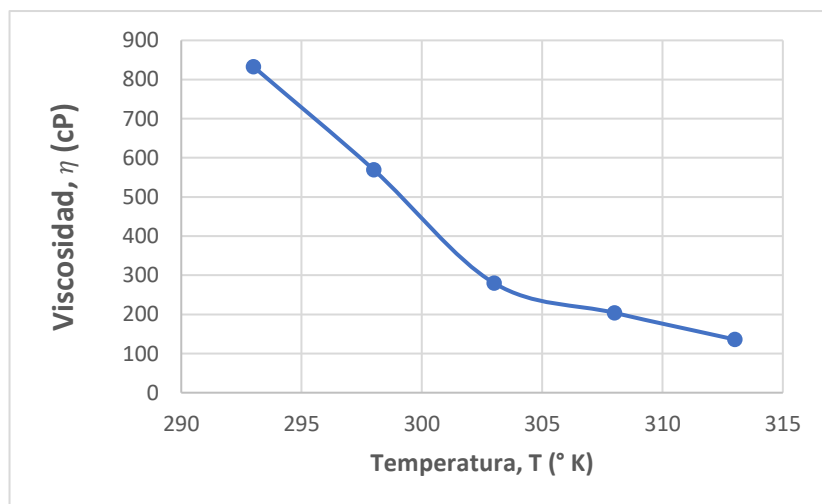
*Viscosidades (η), en centipoise, del concentrado de manzana (*Malus domestica*) y a concentración χ de 10°Brix en función de la temperatura, $T(^{\circ}\text{C})$.*

Temperatura, $T (^{\circ}\text{K})$	Viscosidad, η (centipoise)
293	832.67
298	372.67
308	280
318	204
328	136

Nota: Elaboración propia

Figura 1.

*Viscosidad en función de la Temperatura Concentrado de Manzana (*Malus domestica*) y a χ de 10° Brix*



Nota: Elaboración propia

$$\eta_0 = \frac{832,67 \times 136,00 - 280,00^2}{832,67 + 136,00 - 2(280,00)} = 85,26$$

$$\eta = 85,26 + 1,5232 \times 10^{20} \times e^{-0,1357 \times T}$$

Con coeficiente de determinación de Person de: $r^2 \times 100 = 98,85\%$.

El resultado del modelamiento de la viscosidad del concentrado de manzana (*Malus domestica*) en función de la temperatura ha mostrado un alto coeficiente de determinación de Person, con un valor de 98.85%. Esto indica que el modelo ajustado explica el 98.85% de la variabilidad observada en los datos de viscosidad en relación con la temperatura.

Para la concentración de 10° Brix, los valores de viscosidad a diferentes temperaturas se presentan de la siguiente manera: a 293 K (20 °C), la viscosidad es de 832.67 centipoise (cp); a 298 K (25 °C), es de 372.67 centipoise (cp); a 308 K (35 °C), es de 280 centipoise (cp); a 318 K (45 °C), es de 204 centipoise (cp); y a 328 K (55 °C), es de 136 centipoise (cp). Estos resultados reflejan una disminución clara en la viscosidad del concentrado a medida que la temperatura aumenta, corroborando la tendencia general observada en el estudio. La alta correlación y la significativa disminución en la viscosidad con el incremento de la temperatura resaltan la robustez del modelo y su capacidad para predecir con precisión el comportamiento reológico del concentrado de manzana en función de la temperatura.

Tabla 10.

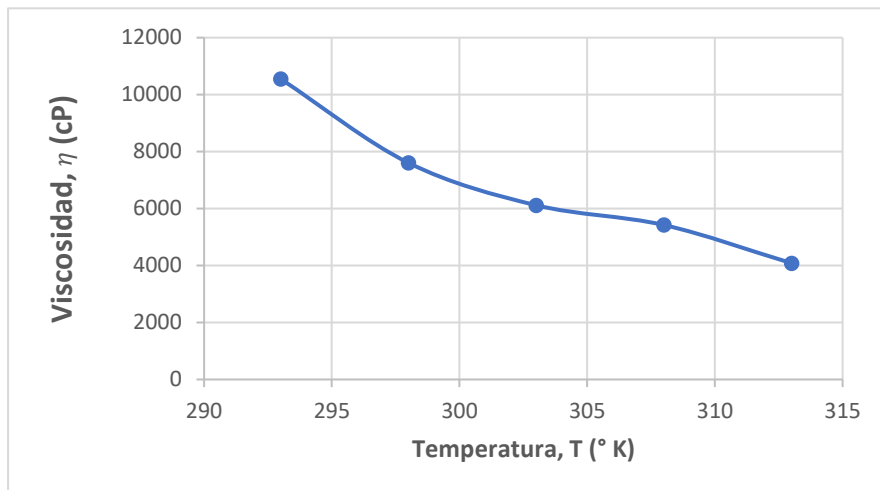
*Viscosidades (η), en centipoise, del concentrado de manzana (*Malus domestica*) y a concentración χ de 15°Brix en función de la temperatura, $T(^{\circ}\text{C})$.*

Temperatura, T (° K)	Viscosidad, η (centipoise)
293	10550.00
298	7605.67
308	6116.67
318	5422.67
328	4083.33

Nota: Elaboración propia

Figura 2.

Viscosidad en función de la Temperatura Concentrado de Manzana (Malus domestica) y a χ de 15° Brix



Nota: Elaboración propia

$$\eta_0 = \frac{10550,00 \times 4083,33 - 6116,67^2}{10550,00 + 4083,33 - 2(6116,67)} = 2360,63$$

$$\eta = 2360,63 + 5,3185 \times 10^{13} \times e^{-0,0769 \times T}$$

Con coeficiente de determinación de Person de: $r^2 \times 100 = 97,90\%$

El modelamiento matemático de la viscosidad en función de la temperatura para el concentrado de manzana (*Malus domestica*) a una concentración de 15° Brix ha mostrado un excelente ajuste. El coeficiente de determinación de Pearson, r^2 es del 97.90%, lo que indica que el modelo explica el 97.90% de la variabilidad observada en los datos experimentales.

A 293 K, la viscosidad medida es de 10,550.00 centipoise; a 298 K, es de 7,605.67 centipoise; a 308 K, es de 6,116.67 centipoise; a 318 K, es de 5,422.67 centipoise; y a 328 K, es de 4,083.33 centipoise. Estos valores confirman que la viscosidad del concentrado de manzana disminuye de manera significativa con el aumento de la temperatura, lo cual es consistente con el comportamiento esperado para este tipo de fluido.

Tabla 11.

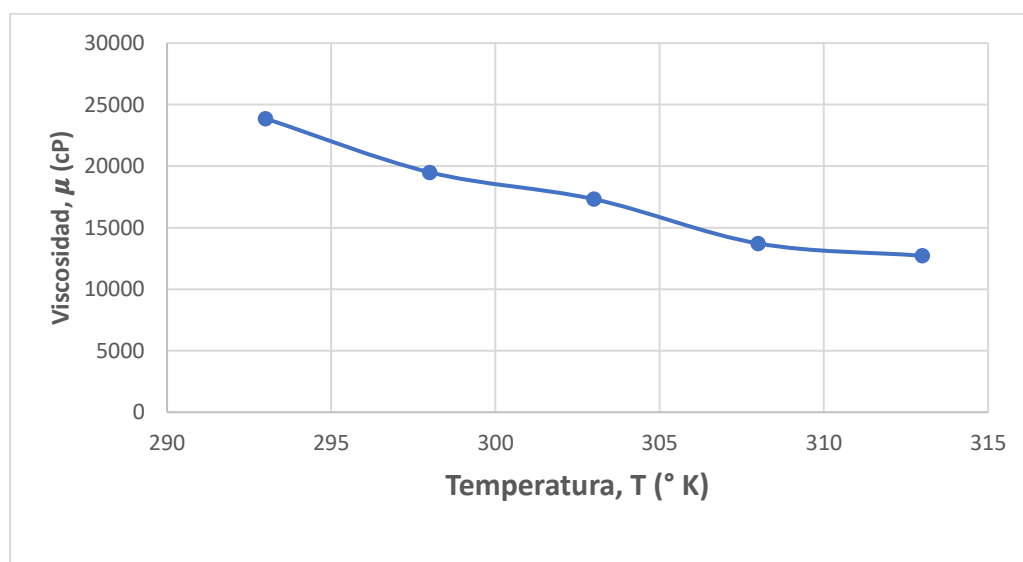
*Viscosidades (η), en centipoise, del concentrado de manzana (*Malus domestica*) y a concentración χ de 20°Brix en función de la temperatura, $T(^{\circ}\text{C})$.*

Temperatura, $T (^{\circ}\text{K})$	Viscosidad, η (centipoise)
293	23863.33
298	19500.00
308	17316.67
318	13716.67
328	12716.67

Nota: Elaboración propia

Figura 3.

*Viscosidad en función de la Temperatura Concentrado de Manzana (*Malus domestica*) y a χ de 20° Brix.*



Nota: Elaboración propia

$$\eta_0 = \frac{23863,33 \times 12716,67 - 17316,67^2}{10550,00 + 4083,33 - 2(6116,67)} = 1846,77$$

$$\eta = 1846,77 + 8,6621 \times 10^8 \times e^{-0,0362 \times T}$$

Con coeficiente de determinación de Person de: $r^2 \times 100 = 98,18\%$

El análisis de modelamiento matemático para la viscosidad del concentrado de manzana (*Malus domestica*) a una concentración de 20° Brix en función de la temperatura ha demostrado un ajuste altamente preciso, con un coeficiente de determinación de Pearson de $r^2 = 98.18\%$; este elevado valor del coeficiente de determinación indica que el modelo empleado es capaz de explicar el 98.18% de la variabilidad observada en los valores de viscosidad medidos, lo que sugiere un excelente grado de fiabilidad en la predicción de la viscosidad a diferentes temperaturas.

A una temperatura de 293 K, la viscosidad registrada es de 23,863.33 centipoise, disminuyendo a 19,500.00 centipoise a 298 K. A medida que la temperatura continúa aumentando, la viscosidad sigue una tendencia descendente, alcanzando 17,316.67 centipoise a 308 K, 13,716.67 centipoise a 318 K, y finalmente 12,716.67 centipoise a 328 K. Esta notable reducción en la viscosidad con el incremento de la temperatura es un comportamiento característico de los concentrados de jugo, reflejando cómo las interacciones moleculares se ven alteradas a mayores temperaturas, facilitando un flujo más fácil del líquido.

El resultado de este modelamiento es crucial para optimizar los procesos industriales, ya que permite predecir con alta precisión cómo se comportará la viscosidad del concentrado de manzana bajo diferentes condiciones de temperatura, lo cual es esencial para garantizar la calidad y consistencia del producto final.

Tabla 12.

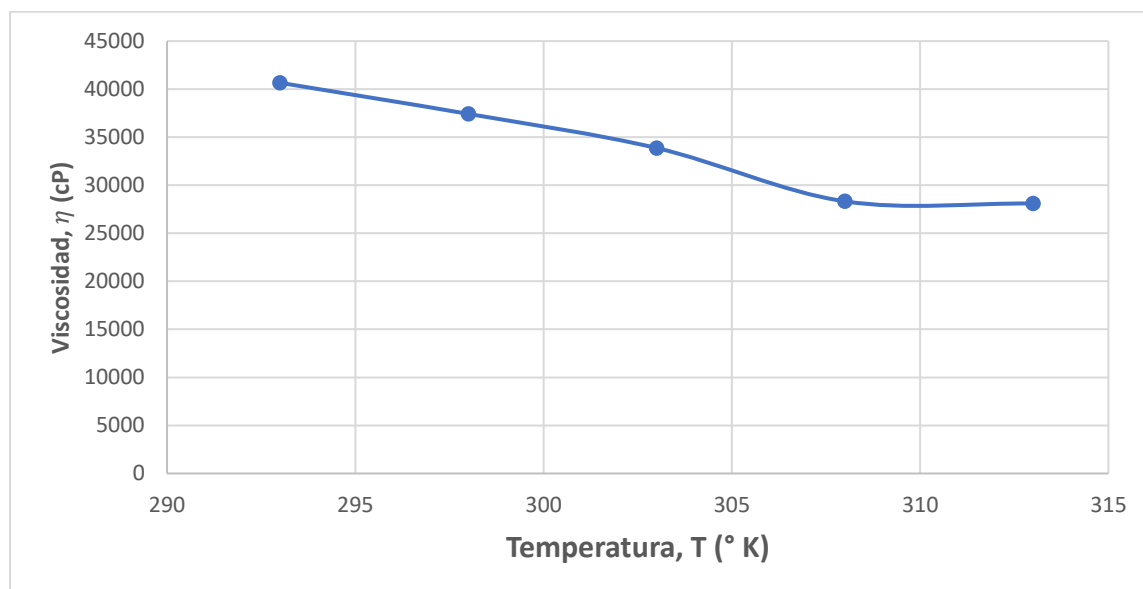
*Viscosidades (η), en centipoise, del concentrado de manzana (*Malus domestica*) y a concentración χ de 25°Brix en función de la temperatura, $T(^{\circ}\text{C})$.*

Temperatura, $T (^{\circ}\text{K})$	Viscosidad, η (centipoise)
293	40660.00
298	37423.33
308	33872.33
318	28323.33
328	28094.27

Nota: Elaboración propia

Figura 4.

*Viscosidad en función de la Temperatura Concentrado de Manzana (*Malus domestica*) y a χ de 25° Brix*



Nota: Elaboración propia

$$\eta_0 = \frac{40660,00 \times 28094,27 - 33872,33^2}{40660,00 + 28094,27 - 2(33872,33)} = 3463,09$$

$$\eta = 3463,09 + 2,9171 \times 10^7 \times e^{-0,0227 \times T}$$

Con coeficiente de determinación de Person de: $r^2 \times 100 = 95,10\%$.

El modelamiento matemático de la viscosidad del concentrado de manzana (*Malus domestica*) a una concentración de 20° Brix en función de la temperatura revela un ajuste considerablemente sólido, evidenciado por un coeficiente de determinación de Pearson de $r^2 = 95.10\%$. Este valor indica que el modelo propuesto es capaz de explicar el 95.10% de la variabilidad observada en los datos experimentales, lo que demuestra su eficacia para representar el comportamiento reológico del concentrado de manzana bajo las condiciones de temperatura estudiadas.

A 293 K, la viscosidad del concentrado es de 40,660.00 centipoise, mostrando una disminución progresiva conforme la temperatura aumenta. A 298 K, la viscosidad disminuye a 37,423.33 centipoise, y a 308 K, sigue descendiendo hasta 33,872.33 centipoise. Este comportamiento continúa a temperaturas más altas, con una viscosidad de 28,323.33 centipoise a 318 K y 28,094.27 centipoise a 328 K. La notable reducción en la viscosidad con el incremento de la temperatura se alinea con las expectativas teóricas, ya que el aumento térmico reduce la resistencia interna al flujo, facilitando la movilidad de las moléculas dentro del concentrado.

La capacidad del modelo para capturar con precisión esta tendencia decreciente en la viscosidad es crucial para la planificación y control de procesos industriales que involucran concentrados de jugo de manzana. Un coeficiente de determinación de 95.10% refleja un alto grado de confianza en las predicciones del modelo, lo que permite a los ingenieros y técnicos ajustar las condiciones de procesamiento para alcanzar la viscosidad deseada, asegurando la calidad y la consistencia del producto final en diferentes escenarios de producción. Este nivel de precisión es esencial para optimizar tanto la eficiencia como la efectividad de las operaciones, especialmente en contextos donde las variaciones en la viscosidad pueden

impactar significativamente la textura y el comportamiento de los productos derivados del concentrado de manzana.

Tabla 13.

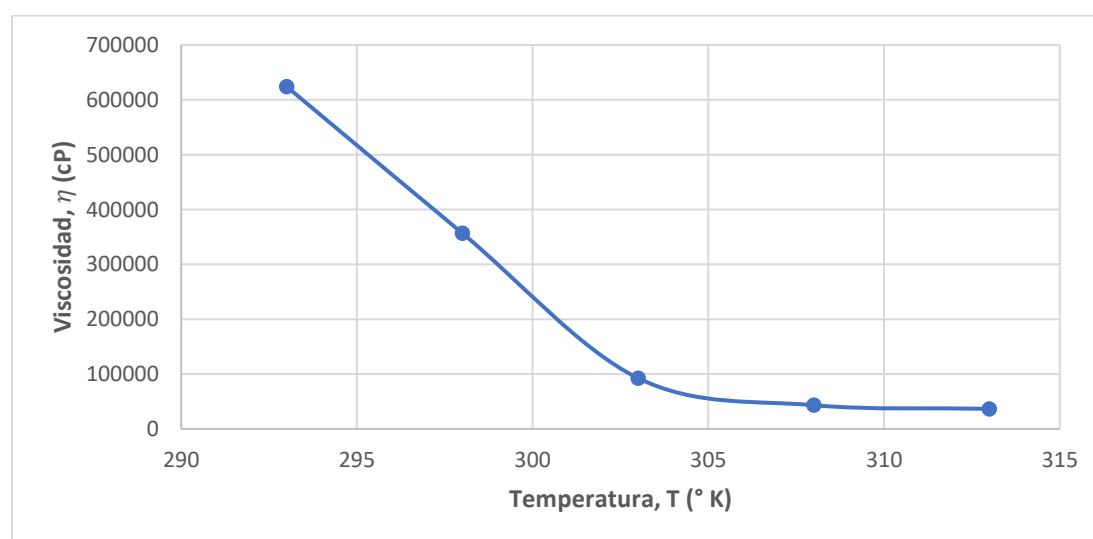
*Viscosidades (η), en centipoise, del concentrado de manzana (*Malus domestica*) y a concentración χ de 30°Brix en función de la temperatura, $T(^{\circ}\text{C})$.*

Temperatura, $T (^{\circ}\text{K})$	Viscosidad, η (centipoise)
293	624033.33
298	356835.33
308	92580.00
318	43173.33
328	36635.95

Nota: Elaboración propia

Figura 5.

*Viscosidad en función de la Temperatura Concentrado de Manzana (*Malus domestica*) y a χ de 30° Brix*



Nota: Elaboración propia

$$\eta_0 = \frac{624033,33 \times 36635,95 - 92580,00^2}{624033,33 + 36635,95 - 2(92580,00)} = 30054,09$$

$$\eta = 30054,09 + 9,2398 \times 10^{36} \times e^{-0,2444 \times T}$$

Con coeficiente de determinación de Person de: $r^2 \times 100 = 97,56\%$.

El análisis del modelamiento matemático que describe la viscosidad del concentrado de manzana (*Malus domestica*) a una concentración de 30° Brix, en función de la temperatura, ha demostrado una notable capacidad predictiva, con un coeficiente de determinación de Pearson de $r^2 = 97.56\%$. Este alto coeficiente indica que el modelo es altamente eficiente en capturar y explicar la variabilidad observada en los datos experimentales, proporcionando una representación robusta de cómo la temperatura afecta la viscosidad de este concentrado de alta concentración de sólidos solubles.

Inicialmente, a 293 K, la viscosidad es considerablemente elevada, alcanzando 624,033.33 centipoise. Este valor refleja la alta resistencia al flujo característica de un concentrado de manzana a una concentración de 30° Brix. Sin embargo, conforme la temperatura aumenta a 298 K, se observa una drástica disminución en la viscosidad, reduciéndose a 356,835.33 centipoise. Esta tendencia de disminución continúa a temperaturas más elevadas, con la viscosidad descendiendo a 92,580.00 centipoise a 308 K, y mostrando una disminución aún más marcada a 43,173.33 centipoise a 318 K. Finalmente, a 328 K, la viscosidad alcanza un valor de 36,635.95 centipoise.

El modelo subraya la sensibilidad de la viscosidad a cambios en la temperatura, especialmente en concentraciones tan altas como 30° Brix. La notable reducción en la viscosidad a medida que la temperatura aumenta sugiere que el concentrado se vuelve significativamente menos resistente al flujo, lo cual es consistente con los principios fundamentales de la reología de fluidos. Este conocimiento es vital para aplicaciones industriales donde la manipulación de concentrados de frutas a diferentes temperaturas es común, ya que permite prever el comportamiento reológico del producto bajo diversas

condiciones de procesamiento. La alta correlación observada en el modelamiento proporciona una herramienta valiosa para optimizar las condiciones de producción, garantizando que los productos finales mantengan la calidad y consistencia deseadas, especialmente en procesos que requieren control preciso de la viscosidad para asegurar la textura y otras propiedades sensoriales del concentrado de manzana.

Análisis e interpretación.

La diferencia en los comportamientos de los modelos matemáticos para la viscosidad del concentrado de manzana a distintas concentraciones de sólidos solubles (medidos en grados Brix) en función de la temperatura se debe a varios factores reológicos y termodinámicos.

Concentración de Sólidos Solubles (°Brix)

A mayor concentración de sólidos solubles, el concentrado de manzana exhibe una viscosidad más alta. Esto se debe a la mayor cantidad de partículas disueltas que crean una red estructural más compleja dentro del fluido, lo que incrementa la resistencia al flujo.

A bajas concentraciones (como 10° Brix), las interacciones entre las moléculas del fluido son menos complejas, lo que resulta en una viscosidad más baja y un comportamiento reológico más simple. A medida que la concentración aumenta (por ejemplo, 30° Brix), la viscosidad se incrementa significativamente debido a la mayor interacción entre las partículas disueltas.

Efecto de la Temperatura

En todos los casos, la viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura.

Este comportamiento es típico de muchos fluidos, donde el calor aporta energía cinética adicional a las moléculas, disminuyendo las fuerzas intermoleculares y facilitando el flujo. Sin embargo, la tasa de disminución de la viscosidad con el incremento de la temperatura varía según la concentración. En concentraciones más bajas, la viscosidad puede disminuir más rápidamente, ya que el fluido es menos resistente al flujo desde el inicio. En concentraciones

más altas, aunque la viscosidad también disminuye, la red estructural interna es más resistente, lo que modera la tasa de disminución.

Modelos Matemáticos

Los modelos matemáticos para cada concentración de °Brix tienen diferentes coeficientes de determinación debido a la forma en que la temperatura interactúa con la estructura interna del fluido a diferentes concentraciones.

Un coeficiente de determinación alto (como 98.85% para 10° Brix) indica que el modelo matemático es capaz de predecir con gran precisión la relación entre temperatura y viscosidad en esa concentración específica, reflejando una relación directa y bien definida.

A concentraciones más altas, el coeficiente de determinación puede ser ligeramente menor (como 95.10% para 25° Brix) debido a la mayor complejidad estructural del fluido, lo que introduce variaciones adicionales no capturadas completamente por el modelo.

Interacciones Moleculares

A bajas temperaturas, los fluidos con alta concentración de sólidos solubles tienen una estructura más rígida, lo que resulta en una viscosidad más alta. Esta estructura se relaja con el aumento de la temperatura, pero a un ritmo diferente según la concentración.

A concentraciones más altas, la relajación de la estructura es menos pronunciada debido a las interacciones más fuertes entre las moléculas, lo que explica por qué la viscosidad permanece relativamente alta incluso a temperaturas más elevadas.

Considerando lo indicado, las diferencias en los comportamientos de los modelos matemáticos se deben principalmente a las diferencias en la concentración de sólidos solubles, la sensibilidad de la viscosidad al cambio de temperatura, y la complejidad de las interacciones moleculares dentro del concentrado de manzana. Estos factores influyen en la precisión con la que los modelos pueden predecir el comportamiento reológico bajo distintas condiciones, lo que se refleja en los diferentes coeficientes de determinación obtenidos en cada caso.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Sobre el efecto de diferentes niveles de concentración y temperatura sobre las características reológicas del jugo de manzana (*Malus domestica*).

El estudio de las características reológicas del jugo de manzana concentrado, especialmente en relación con la concentración de °Brix y la temperatura, revela comportamientos complejos que son críticos para el diseño de procesos industriales y el control de calidad. A través de la evaluación de la viscosidad del jugo de manzana a temperaturas de 55 °C, 35 °C, 25 °C, y 20 °C, se observa cómo la interacción entre temperatura y concentración afecta la naturaleza reológica del jugo, desde un comportamiento no newtoniano hasta la estabilidad reológica.

Comportamiento Reológico a 55 °C

A una temperatura de 55 °C, el jugo de manzana concentrado a 30 °Brix no se comporta estrictamente como un fluido newtoniano. En su lugar, muestra un comportamiento reológico no newtoniano, específicamente pseudoplástico, donde la viscosidad disminuye con el aumento de la tasa de corte. Este fenómeno es característico de muchos fluidos alimentarios, donde la estructura interna del fluido se descompone bajo esfuerzos de corte, lo que resulta en una reducción de la viscosidad (Rao, 2014).

Este comportamiento pseudoplástico es crucial en aplicaciones industriales, donde las altas temperaturas y la manipulación mecánica durante el procesamiento pueden reducir significativamente la viscosidad del jugo, facilitando su bombeo y mezclado. Según Telis et al. (2007), este tipo de comportamiento reológico es común en jugos concentrados debido a la alta interacción entre moléculas de agua y sólidos solubles, que forman una red estructural que se desintegra bajo fuerzas de corte, reduciendo la viscosidad.

Estabilidad Reológica a 35 °C

A 35 °C, se observa una variación mínima en los promedios de viscosidad del jugo de manzana a distintas concentraciones de °Brix. Este comportamiento indica que, a esta temperatura, la viscosidad del jugo es relativamente insensible a las variaciones en la concentración de sólidos solubles, sugiriendo una consistencia reológica estable. Este fenómeno puede ser atribuido a la temperatura dominante, que estabiliza la estructura interna del fluido, minimizando las diferencias en viscosidad causadas por la variación en la concentración de sólidos (Tucker y Acree, 1990).

Este tipo de estabilidad reológica es ventajoso en procesos industriales donde se requiere mantener una viscosidad consistente durante el procesamiento o almacenamiento. En estos casos, el control de la temperatura se convierte en una herramienta clave para asegurar la uniformidad del producto final, sin necesidad de ajustes frecuentes en función de la concentración de sólidos (Rao y Rizvi, 1995).

Consistencia Reológica a 25 °C

A 25 °C, si bien se observa una variación mínima en los promedios de viscosidad del jugo de manzana a diferentes concentraciones de °Brix, la viscosidad del jugo se mantiene relativamente constante. Este comportamiento sugiere que, a esta temperatura, la temperatura sigue siendo un factor dominante que controla la viscosidad, mientras que las fluctuaciones en la concentración de sólidos solubles tienen un efecto menos pronunciado. Según Sikora et al. (2013), la influencia de la temperatura en la reología de los jugos de frutas es predominante a temperaturas moderadas, donde la energía térmica aún controla la dinámica de las moléculas de agua y sólidos.

Este comportamiento es particularmente útil en procesos de producción, ya que asegura una textura uniforme del jugo, independientemente de la concentración de sólidos. En términos industriales, esto significa que, a 25 °C, se puede mantener una viscosidad constante en el jugo

de manzana, facilitando el control de calidad y reduciendo la variabilidad del producto final (Telis et al., 2007).

Influencia Predominante de la Temperatura a 20 °C

Finalmente, a 20 °C, la observación de una variación mínima en los promedios de viscosidad del jugo de manzana a diferentes concentraciones de °Brix sugiere que la viscosidad del jugo es altamente estable a esta temperatura. La consistencia reológica observada indica que, a 20 °C, la temperatura ejerce una influencia predominante, minimizando el impacto de las variaciones en la concentración de sólidos solubles sobre la viscosidad. Este comportamiento puede ser particularmente ventajoso en aplicaciones donde se busca una textura uniforme, garantizando que el producto mantenga una consistencia reológica constante (Peleg, 1983).

En la práctica, esta estabilidad es beneficiosa para el almacenamiento y el transporte del jugo de manzana, ya que permite mantener una calidad constante del producto, reduciendo la necesidad de controles estrictos sobre la concentración de °Brix durante estos procesos (Rao, 2014).

5.2. Sobre el efecto de diferentes niveles de concentración y temperatura sobre el modelamiento matemático del jugo de manzana (*Malus domestica*)

Relación entre Concentración de Sólidos Solubles (°Brix) y Viscosidad

El análisis de la viscosidad del concentrado de manzana a distintas concentraciones de sólidos solubles (°Brix) revela un comportamiento directamente proporcional: a mayor concentración, mayor es la viscosidad. Este fenómeno ha sido extensamente documentado en la literatura científica. Según Rao (2014), la viscosidad de los concentrados de frutas aumenta con la concentración de sólidos debido a la formación de una red estructural más compleja, causada por una mayor cantidad de partículas disueltas, como azúcares y pectinas. Estas

partículas crean una estructura interna que aumenta la resistencia al flujo, resultando en una viscosidad más elevada.

En un estudio específico sobre la viscosidad de jugos de frutas, Sikora et al. (2013) encontraron que la viscosidad se incrementa de manera no lineal con el aumento de la concentración de sólidos solubles. Esto se debe a que, a mayores concentraciones, las interacciones entre las moléculas disueltas son más intensas, lo que contribuye a una mayor resistencia al flujo. Este comportamiento no lineal se explica por la naturaleza coloidal de las soluciones concentradas, donde las fuerzas de atracción y repulsión entre las moléculas crean un sistema estructuralmente complejo.

Otro estudio relevante realizado por Telis et al. (2007) sobre concentrados de jugo de mango y piña concluyó que la viscosidad aumenta significativamente con la concentración de sólidos solubles, reflejando una mayor cohesión molecular y, por lo tanto, una mayor resistencia al flujo. Estos resultados son consistentes con los obtenidos en el presente análisis del concentrado de manzana, donde se observó un incremento considerable en la viscosidad al pasar de 10° Brix a 30° Brix.

Efecto de la Temperatura en la Viscosidad

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad es un fenómeno bien conocido en la reología de fluidos. Generalmente, la viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura, un comportamiento que se ha observado en numerosos estudios reológicos. Esta tendencia se explica por la teoría cinética de los líquidos, que establece que el aumento de la temperatura proporciona mayor energía cinética a las moléculas, lo que disminuye las fuerzas de atracción intermolecular y facilita el flujo del fluido (Rao, 2014).

La ecuación de Arrhenius, ampliamente utilizada para describir la relación entre temperatura y viscosidad, sostiene que la viscosidad de un fluido sigue una relación exponencial inversa con la temperatura. Este modelo ha sido validado en diversos estudios,

incluyendo el trabajo de Rao y Rizvi (1995), quienes aplicaron la ecuación de Arrhenius para predecir la viscosidad de concentrados de jugo de frutas y observaron que la viscosidad disminuye exponencialmente a medida que aumenta la temperatura.

En el presente estudio, se observó que la viscosidad del concentrado de manzana disminuye con el incremento de la temperatura, independientemente de la concentración de sólidos solubles. Este comportamiento es consistente con la teoría y con los resultados de investigaciones previas. Por ejemplo, Telis et al. (2007) observaron una disminución pronunciada en la viscosidad de concentrados de jugo de frutas con el aumento de la temperatura, especialmente en concentraciones bajas de sólidos solubles. Esta tendencia se debe a que, a temperaturas más altas, la energía térmica adicional supera las fuerzas de interacción entre las moléculas, permitiendo un flujo más fácil del líquido.

Comparación entre Diferentes Concentraciones de Sólidos Solubles

Al comparar los resultados obtenidos para diferentes concentraciones de sólidos solubles, se observa que la tasa de disminución de la viscosidad con el aumento de la temperatura varía según la concentración. En concentraciones más bajas, como 10° Brix, la viscosidad disminuye más rápidamente con el incremento de la temperatura. Esto se debe a que, en concentraciones bajas, las interacciones intermoleculares son menos intensas, lo que hace que el fluido sea menos resistente al flujo desde el principio (Rao, 2014).

En concentraciones más altas, como 25° y 30° Brix, aunque la viscosidad también disminuye con el aumento de la temperatura, la estructura interna del fluido es más compleja debido a la mayor cantidad de partículas disueltas. Como resultado, la tasa de disminución de la viscosidad es menos pronunciada. Este comportamiento fue documentado por Sikora et al. (2013), quienes encontraron que, a concentraciones más altas, la red estructural creada por las partículas solubles es más resistente al cambio, lo que modera la tasa de disminución de la viscosidad con el aumento de la temperatura.

Modelos Matemáticos y su Capacidad Predictiva

Los modelos matemáticos utilizados para predecir la viscosidad en función de la temperatura y concentración de sólidos solubles demostraron ser altamente precisos, como lo indican los altos coeficientes de determinación (R^2). Un coeficiente de determinación alto, como 98.85% para 10° Brix, sugiere que el modelo matemático es capaz de predecir con gran precisión la relación entre temperatura y viscosidad para esa concentración específica. Esto refleja una relación directa y bien definida entre las variables analizadas.

Sin embargo, a medida que la concentración de sólidos solubles aumenta, el coeficiente de determinación tiende a disminuir ligeramente, como se observó con el 95.10% para 25° Brix. Esta disminución puede atribuirse a la mayor complejidad estructural del fluido a concentraciones más altas, lo que introduce variaciones adicionales que no son completamente capturadas por el modelo. Según Peleg (1983), los modelos matemáticos para sistemas complejos, como los concentrados de jugo de alta viscosidad, pueden necesitar ajustes adicionales o consideraciones más sofisticadas para capturar todas las interacciones moleculares que ocurren en el sistema.

Interacciones Moleculares y su Impacto en la Reología

La disminución de la viscosidad con el aumento de la temperatura en concentrados de alta concentración de sólidos solubles se relaciona con la relajación de la estructura interna del fluido. A bajas temperaturas, los fluidos con alta concentración de sólidos tienen una estructura más rígida, lo que resulta en una viscosidad más alta. Esta estructura se relaja con el aumento de la temperatura, pero a un ritmo diferente según la concentración de sólidos solubles. En concentraciones más altas, la estructura es más resistente debido a las interacciones moleculares más fuertes, lo que explica por qué la viscosidad permanece relativamente alta incluso a temperaturas más elevadas (Rao, 2014).

Tucker y Acree (1990) describen este fenómeno en términos de la estructura enredada de los fluidos concentrados, donde las interacciones moleculares limitan el flujo del fluido. A concentraciones altas, la estructura interna del fluido se mantiene más estable a pesar del aumento de la temperatura, lo que resulta en una menor disminución de la viscosidad en comparación con concentraciones más bajas. Este comportamiento es consistente con los resultados obtenidos en el presente estudio, donde la viscosidad del concentrado de manzana a 30° Brix disminuyó menos rápidamente con el aumento de la temperatura en comparación con concentraciones más bajas.

VI. CONCLUSIONES

- 6.1. El análisis del comportamiento reológico del jugo de manzana bajo diferentes condiciones de temperatura y concentración revela una fuerte influencia de la temperatura sobre la viscosidad del producto. A 55 °C, el jugo muestra un comportamiento pseudoplástico no newtoniano, mientras que a temperaturas más bajas (35 °C, 25 °C, y 20 °C), se observa una estabilidad reológica considerable, con mínima influencia de la concentración de sólidos solubles. Estos hallazgos tienen implicaciones importantes para la industria alimentaria, donde el control de la temperatura puede ser una herramienta eficaz para asegurar la consistencia del producto final.
- 6.2. Los resultados obtenidos en los modelamientos matemáticos de la viscosidad del concentrado de manzana en función de la temperatura y concentración de sólidos solubles son consistentes con las teorías reológicas establecidas y con investigaciones previas. La relación entre concentración de sólidos solubles y viscosidad es directamente proporcional, y la viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura en todos los casos, aunque la tasa de disminución varía según la concentración. Los modelos matemáticos utilizados demostraron ser altamente precisos, aunque se observó una ligera disminución en la capacidad predictiva a concentraciones más altas debido a la mayor complejidad estructural del fluido. Estos resultados son fundamentales para la optimización de procesos industriales que requieren un control preciso de la viscosidad para garantizar la calidad y consistencia del producto final.

VII. RECOMENDACIONES

- 7.1. Ampliar el Rango de Temperaturas para obtener una comprensión más completa del comportamiento reológico del concentrado de manzana. Esto podría revelar patrones adicionales o comportamientos inesperados que podrían no ser evidentes en el rango actual.
- 7.2. Realizar mediciones más frecuentes en intervalos de temperatura para obtener un perfil más detallado de cómo la viscosidad cambia con la temperatura y la concentración. Esto puede mejorar la precisión del modelamiento matemático y la predicción del comportamiento del concentrado.
- 7.3. Probar diferentes tipos de concentrados de manzana o incluso otros tipos de frutas para comparar cómo las características reológicas varían entre diferentes productos. Esto podría ayudar a generalizar los hallazgos o identificar peculiaridades específicas del concentrado de manzana.
- 7.4. Considerar la inclusión de otros parámetros en el estudio, como el pH o la composición química del concentrado, para entender mejor cómo estos factores podrían influir en la viscosidad y el comportamiento reológico.
- 7.5. Realizar Estudios a Diferentes Tasa de Corte: Evaluar cómo la viscosidad varía a diferentes tasas de corte (velocidades de deformación) para confirmar si el concentrado de manzana se comporta de manera pseudopolítica y para obtener una comprensión más precisa de su comportamiento reológico en diferentes condiciones de flujo.
- 7.6. Repetir Experimentos en Condiciones Variables: Repetir los experimentos bajo diferentes condiciones experimentales (como diferentes equipos o métodos de medición) para asegurar la reproducibilidad y la consistencia de los resultados. Esto también puede ayudar a identificar y controlar posibles Notas de variabilidad experimental.

- 7.7. Explorar Aplicaciones Industriales: Investigar cómo los resultados obtenidos pueden aplicarse en contextos industriales, como en el procesamiento y almacenamiento de concentrados de manzana. Esto puede implicar la evaluación de la viscosidad en condiciones de procesamiento realistas y la optimización de procesos para garantizar la calidad y la consistencia del producto final.

VIII. REFERENCIAS

- Alvarado J. (2006). *Principios de Ingeniería Aplicados a los Alimentos*. Editorial Radio Comunicaciones.
- Barnes, H. (1997). Thixotropy: A review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 70(1), 1-33. [https://doi.org/10.1016/S0377-0257\(97\)00013-9](https://doi.org/10.1016/S0377-0257(97)00013-9)
- Barreiro J. Sandoval A. Guédez A y Luciani Y. (2016) *Comportamiento reológico de concentrados de tomate: efecto de la temperatura y la concentración*. Archivos Latinoamericanos de Nutrición. Órgano Oficial de la Sociedad Latinoamericana de Nutrición. Departamento de Tecnología de Alimentos y Bioquímicos. Universidad Simón Bolívar.
- Bird R. B., Stewart E. y Lightfoot R. (2018). *Fenómenos de transporte*. Editorial Reverté.
- Bourne, M. (2003) Physical properties and structure of horticultural products. In M. Peleg, and E. B. Bagley, *Physical Properties of Foods*.
- Brennan J., Butters J., Cowell N. y Lilly A. (2004) *Ingeniería de las operaciones en alimentos*. Applied Science.
- Castro E., Rojo O., Miranda M. y Salazar J. (2010) *Parámetros reológicos de néctar de manzana (10% sólidos solubles)*. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Universidad de Chile.
- Cheftel J., Cheftel H. y Besancon P. (1995) *Introducción a la Bioquímica y Tecnología de los Alimentos*. Vol. II. Editorial Acribia. S. A.
- Chen, C., Wu, X. (2020). Influence of concentration on the rheological properties of fruit juices. *Journal of Food Science and Technology*, 57(8), 2851-2860. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04377>

- Chen, C., y Wu, X. (2019). Influence of temperature on the stability and antioxidant properties of apple juice. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(11), e14172. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14172>
- Codex Stan 247. (2005) *Norma General del Codex para zumos (jugos) y néctar de frutas*. Normatividad del Codex Alimentarius. (11^{ava} Edición).
- Costell E., Durán L. (2002) *Reología Fisicoquímica de los Zumos y Purés de Fruta*. Rev. *Agroquímica. Tecnología Alimentaria*. 22(3), 381-393.
- Fernández-Salguero, J., Gómez, R., y Caballero, I. (2021). *Thermal processing effects on the rheology and sensory attributes of Newtonian fruit juices*. *Journal of Food Quality*, 2021, 8890653. <https://doi.org/10.1155/2021/8890653>
- Fito, P., Chiralt, A., Barat, J. M., y Andrés, A. (1996). Effect of thermal and osmotic treatments on the viscoelastic properties of tomato puree. *Journal of Food Engineering*, 27(2), 191-206. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00025-9](https://doi.org/10.1016/0260-8774(95)00025-9)
- Flores J. (1998) Relación entre la Concentración y las Propiedades Reológicas de los Zumos y Purés de Fruta y Hortalizas. *Rev. Agroquim. Tecnol. Aliment.* 20(1), 71-77.
- García-Martínez, E., Ruiz-Díez, B., y Gómez, A. H. (2020). Rheological behavior of different fruit juices: Impact of concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*, 276, 109888. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109888>
- Ibarz A, Gonzales C, Vicente M., (2008) *Comportamiento reológico de zumo y concentrado de melocotón*. Facultad de Química (Universidad de Barcelona) y Departamento de Tecnologías de los Alimentos (Universidad de Cataluña).
- Irazábal, C. (2008) *Características reológicas de Productos de frutas tropicales*. Universidad Simón Bolívar.

- Kleopatra, T., Maria, P. y Ioanna, M. (2015). Rheological, Physical, and Sensory Attributes of Gluten-Free Rice Cakes Containing Resistant Starch. *Journal of Food Science*. 80 (2), 341-348.
- Kokini, J. (2012). *Rheological propiedades of foods*. En Handbook of food engineering. Editorial Marcel Dekker.
- Liu, Y., Sun, J., Wu, S. (2021). Impact of concentration and temperature on the viscosity of Newtonian fruit juices. *Journal of Food Engineering*, 292, 110268.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110268>
- Liu, Y., Sun, J., Wu, S. (2021). Impact of thermal treatment on the rheological properties of concentrated apple juice. *Journal of Food Engineering*, 292, 110268.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110268>
- Meijide, L. y Rubín, M. (2011) *Desnaturalización y deformación de jugos y zumos de frutas silvestres, despectinizado y clarificados*. (8va ed.). Editorial Latinoamericana Indoamérica.
- Mendez-Sánchez A., Pérez-Trejo L y Paniagua A. (2010) *Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos* (una revisión del viscosímetro de couette). Escuela Superior de Física y Matemática. Instituto Politécnico Nacional. Universidad Autónoma de México.
- Montgomery, D. y Runger, G. (2018). *Applied statistics and probability for engineers* (7th ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119307564>
- Muller H. (2013) *Introducción a la Reología de los Alimentos*. Editorial Acribia.
- Osorio F., Ciro J., Mejia G. (2005) Caracterización reológica y textural del queso Edam. *Dyna*, 72(147), 33-45.
- Osorio, F. (2012) *Aspectos reológicos de alimentos fluidos*. Facultad de Ingeniería. Universidad La Serena.

- Peleg, M. (1983). *Physical properties of foods: A laboratory manual*. CRC Press.
- Rao, M. (1999). *Rheology of fluid and semisolid foods: Principles and applications*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4897-6>
- Rao, M. (2014). *Rheology of fluid and semisolid foods: Principles and applications* (2nd ed.). Springer.
- Rao, M., Cooley, H., y Vitali, A. (1984). Flow properties of concentrated orange juice: Effect of temperature and concentration. *Journal of Food Science*, 49(1), 230-235. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1984.tb13719>.
- Rao, M., Rizvi, S. (Eds.). (1995). *Engineering properties of foods* (2nd ed.). CRC Press.
- Rao, M., Rizvi, S. (2019). Temperature effects on the rheology of Newtonian juices. In *Engineering properties of foods* (pp. 89-114). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429149150>
- Saeed, F., Pasha, I., y Khan, M. I. (2022). Rheological characterization of apple juice concentrates under different thermal conditions. *Journal of Food Science and Technology*, 59(3), 1030-1038. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05056-3>
- Sherman, P. (2003) *Propiedades reológicas de emulsiones*. Enciclopedia de la Tecnología de la emulsión, Becher.
- Sikora, M., Krystyjan, M., Adamczyk, G., Tomasik, P., y Dobosz, A. (2013). The effect of sugars and thickeners on the rheological properties of fruit concentrates. *Journal of Food Engineering*, 115(3), 327-334. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.11.007>
- Smith, J. (2020). *Fundamentals of Rheology*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819786-6.00001-2>
- Steffe, J. (1996). *Rheological methods in food process engineering* (2nd ed.). Freeman Press. [https://doi.org/10.1016/S0377-0257\(98\)00013-6](https://doi.org/10.1016/S0377-0257(98)00013-6)

- Tanglertpaibul, T., y Rao, M. (1987). Rheological properties of tomato concentrates as affected by particle size and method of concentration. *Journal of Food Science*, 52(1), 141-145. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1987.tb14035>.
- Telis, V. Telis-Romero, J., Gabas, A. y Alves, M. (2007). Viscosity of juice concentrates as a function of temperature and concentration: A study of mango and pineapple. *Journal of Food Engineering*, 82(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.12.022>
- Telis, V., Telis-Romero, J., Gabas, A., y Alves, M. (2007). Viscosity of juice concentrates as a function of temperature and concentration: A study of mango and pineapple. *Journal of Food Engineering*, 82(1), 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.12.022>
- Tucker, G., Acree, T. (1990). *Rheological properties of food*. In *Physical and chemical properties of food* (pp. 335-370). Springer.
- Wang, X., Zhang, Y., y Li, H. (2020). Effect of concentration and temperature on the rheological behavior and stability of fruit juices. *Food Hydrocolloids*, 105, 105836. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105836>
- Whitaker M. (2014) *La deformación de alimentos fluidos y comportamiento*. (2da Ed.). Editorial Latinoamericana.
- Whorlow R. (2002). *Rheological Techniques* (3ra Ed.). Jhon W. Mason.
- Wrusch C. (2005). *El Reotron, nuevo viscosímetro y elástómetro Brabender*. *Afinidad* XXXII(Enero –Febrero), 37-44.
- Xu, S., Tang, Z., y Wang, Z. (2005). Effect of break temperature on apparent viscosity of tomato pastes made from four different varieties. *Journal of Food Engineering*, 66(4), 521-525. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.022>.

Zhang, L., Zhao, W., y Li, Z. (2023). Optimizing the processing conditions of fruit juices:
The role of temperature and concentration. *Journal of Food Science and
Technology*, 60(2), 505-515. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05489-2>

GLOSARIO

- **Agua destilada.** Agua que, por medio del calor, en recipientes adecuados, se ha separado sustancias volátiles, de otras más pesadas.
- **Concordancia.** Correspondencia de resultados y eventos.
- **Correlaciones.** Relación recíproca entre dos o más fenómenos o procesos.
- **Densidad.** Relación cuantitativa entre la masa de un cuerpo y el volumen que la ocupa.
- **Empuje.** Fuerza que actúa ascendentemente, en el seno de un líquido.
- **Energía de Activación.** Magnitud física que indica la capacidad de un sistema para realizar un trabajo mecánico.
- **Expansión Térmica.** Acción y efecto de expandirse debido a la temperatura.
- **Fenómenos de Transporte.** Es todo lo que está relacionado con el movimiento, transporte de materiales y otros fenómenos naturales.
- **Fluido Newtoniano.** Cuerpos cuyas moléculas tienen poca cohesión, adoptan la forma del recipiente que los contiene y que siguen la ley de Newton.
- **Fuerza Neta.** Causa capaz de modificar el estado de reposo o de movimiento de un cuerpo.
- **Fuerza Normal.** Es la que, en un movimiento central forzado, tiende a acercarlo a él.
- **Fuerza Tangencial.** Es la que, en un movimiento central forzado, tiende a alejarlo de él.
- **Tendencia Lineal.** Es aquella distribución recta o en línea.
- **Movimiento.** Acción y efecto de moverse, produciendo un desplazamiento.
- **Newtoniano.** Cuerpos, sistemas y mecanismos que siguen las leyes de Newton.
- **Procesos Unitarios.** Conjunto de fases sucesivas de un fenómeno natural o artificial.
- **Refractómetro.** Instrumento que sirve para medir el cambio de dirección que experimenta la luz o cualquier otra onda, al pasar de un medio a otro.

- **Resistencia de Flotación.** Capacidad de soportar presiones hidráulicas.
- **Resistencia de Forma.** Dificultad que se opone al movimiento, debido a la forma física.
- **Resistencia de Fricción.** Causa que se opone al movimiento de un cuerpo debido a su propia masa.
- **Sólidos Solubles.** Componentes que se encuentran flotando en el seno de un fluido.
- **Termo físicas.** Relación del calor con los factores físicos, principalmente las propiedades.
- **Termodinámicas.** Interrelación entre el calor y las restantes formas de energía.
- **Transferencia de calor.** Es el paso de calor de un lugar a otro.
- **Transferencia de masa.** Es el paso de masa o de materia a otro lugar.
- **Viscosidad.** Resistencia que ofrecen los fluidos a la deformación.

IX. ANEXOS

Anexo A. Estudio de las propiedades termo físicas de los alimentos.

Los alimentos además de ofrecer olor sabor y color característicos, exhiben un comportamiento mecánico y en cierta manera reaccionan cuando se intenta deformarlos. Los alimentos pueden ser duros o blandos, gomosos o quebradizos, de textura uniforme o fibrosa, unos fluyen con facilidad y otros con dificultad, etc.

Para estimar el comportamiento mecánico de los alimentos existen dos procedimientos: 1) uno de ellos consiste en morder, estrujar, masticar o tocar y describir las sensaciones reológicas(fisiológico-psicológico), método considerado subjetivo, y 2) el otro procedimiento es aquel que utiliza como evaluación los métodos físicos, en este caso el valor no depende del individuo que efectúa la medición sino del instrumento empleado, método considerado objetivo(reología). Cuando se juntan los dos métodos se denomina Psicorreología.

Justificación de los estudios de las propiedades termo físicas. Existen cuatro razones básicas por las cuales son importantes el estudio de las propiedades termo físicas:1) contribuye al conocimiento de la estructura del alimento, 2) en la industria con frecuencia se efectúan medidas de densidad, viscosidad y otras propiedades; a las materias primas y a los productos en elaboración, 3) el estudio de las propiedades termo físicas presta una valiosa ayuda al diseño de máquinas y accesorios, y 4) el conocimiento de las propiedades termo físicas de un alimento contribuye de modo considerable en la aceptación del producto por el consumidor.

Dificultades de las valoraciones de las propiedades termo físicas. Son dos realmente las dificultades que ofrecen los alimentos: 1) la casi infinita diversidad de estos, y 2) todos ofrecen propiedades diferentes.

Determinación de la viscosidad. Adicional a la técnica empleada en la presente investigación, existen a nivel de laboratorio cuatro técnicas generales: 1) flujo a través de tubos, 2) viscosímetros rotacionales, 3) viscosímetros vibracionales, y 4) compresión de cilindros.

Líquido Newtoniano. Es aquel líquido que sigue las leyes de Newton. Está representado por el agua pura, cuya viscosidad (después de 480 correlaciones), puede calcularse por la ecuación de Bingham:

$$\frac{1}{\mu} = 2,1482 \times \left[(t - 8,435) + \sqrt{8078,4 + (t - 8,435)^2} \right] - 120$$

Donde: μ es la viscosidad en cP y t es la temperatura en °C.