

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“DETERMINACIÓN DE LOS MODELOS
REOLÓGICOS ASOCIADOS AL ZUMO DE
MANGO KENT (*Mangifera indica L.*)”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO**

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Daril', is positioned to the left of the author's name.

DARIL GIOVANNI MARTÍNEZ HILARIO
VICTOR ANDRES NOVOA REVELO

Callao, Febrero, 2018

PERÚ

PRÓLOGO DEL JURADO

La presente Tesis fue Sustentada por los Bachilleres **NOVOA REVELO VICTOR ANDRES** y **MARTÍNEZ HILARIO DARIL GIOVANNI** ante el **JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS** conformado por los siguientes Docentes Ordinarios:

ING. MEDINA COLLANA JUAN TAUMATURGO	: PRESIDENTE
ING. SUERO IQUIAPAZA POLICARPO AGATÓN	: SECRETARIO
ING. LUNA CHAVEZ CARMEN MABEL	: VOCAL
ING. CARRASCO VENEGAS LUIS AMERICO	: ASESOR

Tal como está asentado en el Libro N° 2 Folio N° 106 y Acta N° 289 de Sustentación por la Modalidad de Tesis sin Ciclo de Tesis, de fecha **14 DE FEBRERO 2018**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la modalidad de Tesis sin Ciclo de Tesis, de conformidad establecido por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado por Resolución N° 082-2011-CU de fecha 29 de abril de 2011 y Resolución N° 221-2012-CU de fecha 19 de setiembre de 2012.

INDICE

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.1. Identificación del problema	13
1.2. Formulación del problema	14
1.3. Objetivos de la investigación	14
1.4. Justificación	15
II. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1. Antecedentes del estudio.....	17
2.2. Mango Kent (<i>Magnifera indica L.</i>).....	19
2.3. Reología	20
2.4. Determinación de propiedades reológicas en los alimentos	24
2.5. Viscosidad	26
2.6. Clasificación de los fluidos según su comportamiento reológico	27
2.7. Fluidos newtonianos	29
2.8. Fluidos no newtonianos	30
2.9. Parámetros reológicos en fluidos no newtonianos.....	35
2.10. Modelos de ajuste para comportamiento reológico de alimentos	36
2.11. Método de mínimos cuadrados para los modelos reológicos..	41

2.12.	Determinación de la viscosidad	46
2.13.	Variables que influyen en la viscosidad	49
2.14.	Determinación de la energía de activación.....	51
2.15.	Parámetros estadísticos para la evaluación de los modelos reológicos	53
2.16.	Equipos de medición de viscosidad.....	55
2.17.	Definiciones de términos básicos	56
III.	VARIABLES E HIPÓTESIS	58
3.1.	Definición de las variables de la investigación.....	58
3.2.	Operacionalización de las variables.....	59
3.3.	Hipótesis general e hipótesis específicas	60
IV.	METODOLOGIA.....	61
4.1.	Tipo de investigación	61
4.2.	Diseño de la investigación	62
4.3.	Población y muestra	63
4.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	63
4.4.1.	Lugar de ejecución	63
4.4.2.	Técnica de recolección de datos.....	63
4.4.3.	Instrumentos de recolección de datos.....	64
4.4.4.	Procedimiento de recolección de datos.....	65

4.5.	Procedimiento de recolección de datos	74
4.5.1.	Fuentes primarias.....	74
4.5.2.	Fuentes secundarias.....	74
4.6.	Procesamiento y análisis de datos.....	74
V.	RESULTADOS	75
5.1.	Extracción del zumo de mango Kent	75
5.2.	Concentración del zumo de mango Kent.....	75
5.3.	Determinación de los datos reológicos para el zumo de mango Kent	76
5.4.	Determinación de la relación numérica para los datos reológicos del zumo de mango Kent.....	82
5.5.	Modelos matemáticos ajustados a los datos reológicos del zumo de mango.....	94
5.6.	Gráficos de viscosidad.....	98
5.7.	Cálculo de la energía de activación	103
5.8.	Evaluación estadística de los modelos reológicos.....	109
VI.	DISCUSION DE RESULTADOS	112
VII.	CONCLUSIONES.....	118
VIII.	RECOMENDACIONES	120
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	121

ANEXOS	125
a. Matriz de consistencia	126
b. Datos reológicos del zumo de mango Kent	127
c. Tablas de viscosidad del zumo de mango Kent.....	133
d. Tablas de energía de activación del zumo de mango Kent	136
e. Clasificación taxonómica del mango Kent (Mangifera indica L.).....	139
f. Composición proximal	140
g. Nivel mínimo de grados Brix para zumo y/o puré de frutas.....	141

TABLAS DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1: Curvas de viscosidad para fluidos newtonianos.....	30
Figura N° 2.2: Tipos de fluidos.....	32
Figura N° 2.3: Fluidos Tixotrópicos.....	34
Figura N° 2.4: Fluidos Reopécticos.....	35
Figura N° 2.5: Reómetro Rheolab QC.....	55
Figura N° 4.1: Mango Kent (Mangifera indica L).....	66
Figura N° 4.2: Extracción del zumo de mango Kent.....	67
Figura N° 4.3: Medición de °Brix.....	68
Figura N° 4.4: Termorregulador.....	69
Figura N° 4.5: Sistema de medición de reología.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 2.1: Modelos matemáticos.....	41
Tabla N° 2.2: Desarrollo de mínimos cuadrados para los modelos matemáticos.....	42
Tabla N° 2.3: Viscosidad aparente y viscosidad diferencial.....	48
Tabla N° 2.4: Esquema para el cálculo de energía de activación.....	52
Tabla N° 4.1: Diseño de experimentación por bloques.....	71
Tabla N° 5.1: Características fisicoquímicas de la materia prima.....	76
Tabla N° 5.2: Diluciones del zumo de mango Kent.....	77
Tabla N° 5.3: Parámetros para el modelo de Ley de Potencia.....	88
Tabla N° 5.4: Parámetros para el modelo de Robertson Stiff.....	89
Tabla N° 5.5: Parámetros para el modelo de Casson.....	90
Tabla N° 5.6: Parámetros para el modelo de Herschel Bulkley.....	91
Tabla N° 5.7: Parámetros para el modelo de Mizrahi-Berk.....	92
Tabla N° 5.8: Parámetros para el modelo de Sisko.....	93
Tabla N° 5.9: Parámetros para el modelo de Ellis.....	94
Tabla N° 5.10: Calculo de la energía de activación.....	104
Tabla N° 6.1: Resultados experimentales del grado de ajuste de los modelos reológicos	112

Tabla N° 6.2: Parámetros del modelo de Sisko	113
Tabla N° 6.3: Principales modelos pseudoplásticos	116

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica N° 5.1: Reograma a 10 °C.....	77
Gráfica N° 5.2: Reograma a 20 °C	77
Gráfica N° 5.3: Reograma a 30°C.....	78
Gráfica N° 5.4: Reograma a 40°C.....	78
Gráfica N° 5.5: Reograma a 50°C.....	79
Gráfica N° 5.5: Reograma a 60°C.....	79
Gráfica N° 5.7: Reograma a 13.5°Brix.....	80
Gráfica N° 5.8: Reograma a 15.5°Brix.....	80
Gráfica N° 5.9: Reograma a 17.1°Brix.....	81
Gráfica N° 5.10: Reograma pseudoplástico.....	81
Gráfica N° 5.11: Ajuste del modelo Ley de Potencia.....	94
Gráfica N° 5.12: Ajuste del modelo Robertson Stiff.....	95
Gráfica N° 5.13: Ajuste del modelo Casson.....	95
Gráfica N° 5.14: Ajuste del modelo Herschel Bulkley.....	96
Gráfica N° 5.15: Ajuste del modelo Mizrahi-Berk.....	96
Gráfica N° 5.16: Ajuste del modelo Sisko.....	97
Gráfica N° 5.17: Ajuste del modelo Ellis.....	97

Gráfica N° 5.18: Viscosidad del modelo Casson.....	98
Gráfica N° 5.19: Viscosidad del modelo Ellis.....	98
Gráfica N° 5.20: Viscosidad del modelo Herschel Bulkley.....	99
Gráfica N° 5.21: Viscosidad del modelo Ley de Potencia.....	99
Gráfica N° 5.22: Viscosidad del modelo Mizrahi-Berk.....	100
Gráfica N° 5.23: Viscosidad del modelo Robertson Stiff.....	100
Gráfica N° 5.24: Viscosidad del modelo Sisko.....	101
Gráfica N° 5.25: Viscosidad a 13.5°Brix.....	101
Gráfica N° 5.26: Viscosidad para 15.5°Brix.....	102
Gráfica N° 5.27: Viscosidad para 17.1°Brix.....	102
Gráfica N°5.28: Cálculo de la energía de activación.....	104
Gráfica N° 5.29: Energía de activación del modelo Casson.....	105
Gráfica N° 5.30: Energía de activación – Ellis.....	106
Gráfica N° 5.31: Energía de activación - Herschel Bulkley.....	106
Gráfica N° 5.32: Energía de activación - Ley de Potencia.....	107
Gráfica N° 5.33: Energía de activación – Mizrahi-Berk.....	107
Gráfica N° 5.34: Energía de activación - Robertson Stiff.....	108
Gráfica N° 5.35: Energía de activación del modelo Sisko.....	108

Gráfica N° 5.36: Diagrama de cajas para R^2	109
Gráfica N° 5.37: Diagrama de Intervalos para R^2	110
Gráfica N° 5.38: Diagrama de Cajas para MSE.....	111
Gráfica N° 5.39: Diagrama de Intervalos para MSE.....	111
Grafica N°6.1: Influencia de la concentración	114
Grafica N°6.2: Influencia de la temperatura	115
Grafica N°6.3: Relación no lineal	116

RESUMEN

En este trabajo experimental fueron evaluados los modelos reológicos asociados al zumo de mango variedad Kent (*Mangifera indica L.*), a las temperaturas de 10, 20, 30,40, 50 y 60 °C y con concentraciones de 13.5, 15.5 y 17.1 °Brix. El zumo fue producido en el Laboratorio de Investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional Del Callao y se analizó su comportamiento reológico utilizando el reómetro rotacional Rheolab QC de cilindros concéntricos con el software Rheoplus. Los datos obtenidos fueron representados en reogramas, los cuales mostraron un comportamiento no newtoniano y pseudoplástico para el zumo.

Los modelos seleccionados para el comportamiento reológico fueron: Ley de Potencia, Casson, Ellis, Herschel Bulkley, Mizrahi-Berk, Sisko y Robertson Stiff; los cuales se desarrollaron por el método de mínimos cuadrados para determinar los parámetros característicos de la materia prima, hallándose así para cada uno la expresión de la viscosidad y la energía de activación, esto a fin de contemplar el modelo óptimo que represente el comportamiento del zumo de mango Kent (*Mangifera indica L.*). Finalmente, la evaluación estadística nos indica que el modelo de Sisko es el que mejor representa el comportamiento reológico del zumo de mango Kent (*Mangifera indica L.*), siendo este el aporte para el diseño de equipos y la industria alimentaria.

Palabras clave: Reograma, mango Kent, pseudoplástico, modelo reológico.

ABSTRACT

The rheological models associated with the growth of the Kent mango variety (*Mangifera indica* L.) at 10, 20, 30, 40, 50 and 60 ° C and at concentrations of 13.5, 15.5 and 17.1 ° Brix. The juice was produced in the Research Laboratory of the Faculty of Chemical Engineering of the National University of Callao and its rheological behavior was analyzed using the Rheolab QC rotational Rheometer of concentric cylinders with Rheoplus software. The obtained data were represented in rheograms, which were found a non-Newtonian and pseudoplastic behavior for the juice.

The models selected for the rheological behavior were: Power Law, Casson, Ellis, Herschel Bulkley, Mizrahi-Berk, Sisko and Robertson Stiff; The factors that determine the relationship between the raw material and the behavior parameter are as follows: mango Kent (*Mangifera indica* L.). Finally, the statistical evaluation indicates that the Sisko model is the best representative of the rheological behavior of mango juice Kent (*Mangifera indica* L.), this being the support for equipment design and the food industry.

Keywords: Rheogram, Kent mango, pseudoplastic, rheological model.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Identificación del problema

En la actualidad el mango se ha convertido en un fruto muy popular en el comercio mundial esto debido a su viabilidad para generar una serie de subproductos atractivos para el consumo actual tales como mermeladas, jugos, conservas, pulpas, deshidratados, energizantes, aromatizantes, etc. Generando un interés económico que nos lleva a la optimización de su procesamiento. Esto hace necesario el diseño de equipos adecuados para la alimentación a las líneas de producción considerando el bombeo, mezclado, intercambio de calor, concentración y transporte del zumo de mango Kent, lo cual es posible conociendo las características físicas y químicas de la materia prima, principalmente las características reológicas. Perú a lo largo de los últimos diez años ha triplicado su producción, convirtiéndose en el cuarto exportador de mango y sus derivados, pero presenta la problemática de no trabajar con maquinaria y equipos adecuados en la industria, utilizando equipos propios para otros frutos como manzanas, naranjas y duraznos que presentan otro comportamiento y por ende generan mermas en la producción y en el aprovechamiento de los derivados del mango.

El aporte de esta investigación proporciona las herramientas necesarias para el diseño de equipos, optimizando el procesamiento de los derivados del zumo de mango Kent basándose en los modelos reológicos que describen su comportamiento.

1.2. Formulación del problema

Problema General

¿Cuáles son los modelos reológicos asociados al zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.)?

Problemas específicos

- a) ¿Cómo se obtienen los datos reológicos asociados al zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.)?
- b) ¿Qué efecto tienen la temperatura y la concentración del zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.) en la obtención de los datos reológicos?
- c) ¿Cuál es la relación numérica entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte determinado experimentalmente para el zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.) ?

1.3. Objetivos de la investigación

Objetivo General

Determinar los modelos reológicos asociados al zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.).

Objetivos Específicos

- a) Obtener los datos reológicos asociados al zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.)
- b) Estudiar el efecto de la temperatura y la concentración del zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.) en la obtención de los datos reológicos.
- c) Determinar en forma experimental la relación numérica entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte para el zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.).

1.4. Justificación

Las razones que justifican la investigación propuesta son las siguientes:

- a) Legal: No aplica en este caso.
- b) Teórica: El estudio se justifica porque los modelos matemáticos son la base del diseño de procesos, al realizar la modelación se determinan constantes que son específicas para cada sistema, como en el caso del modelo reológico del zumo de mango.
- c) Tecnológica: Los resultados de éste estudio serán la base para futuras investigaciones sobre comportamiento reológico y ser extrapolado a diversos ámbitos de estudio.

d) **Económica:** La optimización de los procesos permite la optimización económica. Para los ingenieros que trabajan con zumo de mango, ya sea en industria alimentaria o química en general, los modelos reológicos permitirán el planeamiento del proceso, el cálculo de potencias y las condiciones necesarias para operar.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

A continuación se presenta antecedentes de estudios que guardan relación directa con el objeto de estudio de esta investigación.

VIDAL JRMB 2004, EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE EL COMPORTAMIENTO REOLOGICO DE LA PULPA DE MANGO KEITT

Describen un comportamiento pseudoplástico para el mango Keitt, planteando que la viscosidad disminuye con la temperatura hasta los 40°C, pero para temperaturas entre 50-60 °C, se observa un aumento de la viscosidad explicándolo como un posible aumento de la movilidad y la interacción efectuada entre las fibras halladas en la suspensión.

DA CRUZ, 2016 Propiedades reológicas de Jugo de Buriti (Mauritia flexuosa)

Considero su estudio para temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 °C, por ser valores que incluyen la temperatura típica de almacenamiento (tanto refrigerado como o a medioambiente) y la temperatura representativa de pasteurización en la industria (62°C-65°C/30 min). A su vez describió el efecto de la temperatura en la viscosidad aparente para tasas de deformación

que van hasta el valor de 200 s⁻¹, margen que constituye valores importantes en las operaciones industriales de procesamiento.

VIDAL JRMB, 2001, REOLOGIA DE LA PULPA DE MANGO Y AJUSTE DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA.

Empleando el modelo de Mizrahi – Berk a 16 °Brix y para temperaturas entre 10 a 60 °C, observa que con el aumento de la temperatura se incrementa el índice de comportamiento (Nm) y una disminución del índice de consistencia (KM). Además que la viscosidad disminuye con la temperatura hasta los 40°C, pero para temperaturas entre 50-60 °C, se observa un aumento de la viscosidad explicándolo como una posible gelatinización del almidón presente en la pulpa de mango Keitt.

ORTEGA et al, 2015, EFECTO DE LA TEMPERATURA Y CONCENTRACION SOBRE LAS PROPIEDADES REOLOGICAS DE LA PULPA DE MANGO (Mangifera Indica L.) variedad Tommy Atkins

Estudiaron el comportamiento y los parámetros reológicos de la pulpa de mango para un rango de 15 a 60°C y un margen de concentración de 15-30°Brix empleando un viscosímetro Brookfield Modelo DV-11. Ajustando sus datos al modelo de la

ley de potencia, describiendo un comportamiento pseudoplástico no newtoniano

2.2. Mango Kent (*Mangifera indica* L.)

El mango es una fruta muy importante, cultivada en varias regiones tropicales y subtropicales, y su distribución en el comercio mundial se está expandiendo (YAHIA E.M. 2011). Su cultivo se originó en Assam en la India a partes de Birmania, donde se presenta como un árbol silvestre, pero los comerciantes portugueses y españoles llevaron esta fruta a África oriental y al oeste de México, posteriormente siendo llevado a Brasil y las Indias Occidentales (KOSTERMANS A.J., BOMPARD J.M. 1993, SINHA 2012).

Los cultivos de mangos crecen mejor en climas estacionalmente húmedos/secos de los trópicos de tierras bajas o áreas subtropicales libres de heladas características de los principales países productores de mango. Los mangos tienen un sistema de raíces principales, que es capaz de penetrar profundamente en el suelo. El sitio para el cultivo del mango por lo tanto debe incluir áreas con un perfil profundo del suelo sin la obstrucción para el crecimiento vertical de la raíz (LITZ 2009, SINHA 2012).

De acuerdo a la clasificación taxonómica el mango se ubica de la siguiente manera, según el sistema de clasificación Cronquist (1981):

División : Magnoliophyta

Clase : Magnoliopsida

Sub Clase: Rosidae

Orden : Sapindales

Familia : Anacardiaceae

Género : Mangifera

Especie : Mangifera indica L.

Fuente: Universidad Nacional Mayor de San Marcos –Herbario San Marcos - Museo de Historia Natural.

2.3. Reología

El desarrollo de la industria química seguido por el advenimiento de la producción de polímeros sintéticos a gran escala, dio lugar a una serie de nuevos materiales con comportamiento de flujo "extraño". El estudio de estos materiales hizo que el profesor Eugene C. Bingham en 1928, acuñara una nueva palabra, la reología, a partir de los trabajos de Heráclito (filósofo pre-Socrático), dándole el significado de "todo fluye". En este momento, la Reología se ha establecido como la ciencia de la

deformación y el flujo de la materia, es decir, la manera en la cual los materiales responden a un esfuerzo o tensión aplicada (MACOSKO C.W., 1994). La reología se refiere al flujo y a la deformación de las sustancias y en particular a su comportamiento en la zona transitoria entre sólidos y fluidos. Además, la reología intenta definir una relación entre la tensión que actúa sobre un material dado y la deformación y/o flujo resultante que tiene lugar (BARBOSA G.V., TABILO G. 2005).

La ciencia de la reología creció considerablemente debido al trabajo de investigación realizado sobre polímeros sintéticos y sus soluciones en diferentes disolventes que, a su vez, fue necesario debido a los muchos usos de los polímeros en aplicaciones cotidianas e industriales. Sin embargo, debido a la naturaleza biológica de los alimentos, la reología del alimento ofrece muchas oportunidades únicas de estudio (RAO 2014). Asimismo se señala que en la industria alimentaria las mediciones reológicas son un herramienta muy importante para la caracterización física de la materia prima antes del procesamiento, para los productos intermedios durante la fabricación y para los alimentos terminados (BARBOSA G.V., TABILO G. 2005).

El estudio del comportamiento reológico de los alimentos es esencial dado que es útil en muchas aplicaciones de la ciencia y

tecnología alimentaria, tales como el diseño de procesos y equipos de procesamiento, evaluación de calidad, control de productos alimenticios y comprensión de la estructura de los materiales alimenticios. Debido a la compleja estructura química y física de los alimentos, se requieren amplios datos sobre las propiedades físicas y de ingeniería de los alimentos con la aplicación de los principios de fenómenos de transporte correlacionándolo con el comportamiento reológico, aunándose al desarrollo de nuevos materiales y procesos (**SARAVACOS 2001**)

La reología puede utilizarse para caracterizar no sólo el comportamiento del flujo de los alimentos y otros materiales, sino también las características estructurales. El conocimiento de las propiedades alimentarias de flujo, tales como consistencia, vertibilidad, espesor, viscoelasticidad, viscosidad y tensión de fluencia, contribuye sustancialmente a facilitar el transporte y procesamiento comercial, así como a promover la aceptación del consumidor. La comprensión de la disposición estructural ayuda a predecir el comportamiento o la estabilidad de un material dado con el almacenamiento, el cambio en la humedad y / o la temperatura y el manejo (**WELTI 2003**). En consecuencia, la información reológica básica sobre los materiales es importante no sólo para los ingenieros, sino también para los científicos

alimentarios, procesadores y otros que pueden utilizar esta información y encontrar nuevas aplicaciones. Muchos alimentos no son ni sólidos ni líquidos, pero existen en un estado intermedio de agregación conocido como semilíquido o semisólido. Como consecuencia de la naturaleza compleja y de la falta de límites precisos entre sólidos / semisólidos y líquidos / semilíquidos, muchos alimentos pueden presentar más de un comportamiento reológico dependiendo de sus características específicas y de las condiciones de medición utilizadas durante la caracterización física. Debido a la compleja composición y estructura particular de los alimentos, los enfoques para caracterizar el comportamiento reológico de un alimento se pueden clasificar en cinco métodos: empírico, fenomenológico (incluyendo fundamental e imitativo), viscoelástico lineal, no viscoelástico y micro-reológico. En el caso de los alimentos, los enfoques empíricos y fenomenológicos han sido predominantes en los estudios asociados con las propiedades del flujo (**WELTI 2003; TSCHEUSCHNER 2001**).

La motivación para cualquier estudio reométrico suele ser la esperanza de que el comportamiento observado en situaciones industriales pueda correlacionarse con alguna función reométrica fácilmente medible. La reometría es, por tanto, de importancia potencial en el control de calidad y control de procesos. También

es de importancia potencial para evaluar la utilidad de cualquier modelo constitutivo propuesto para el material de prueba, ya sea que se base en ideas moleculares o continuas. Indirectamente, por lo tanto, la reometría puede ser relevante en el modelado de procesos industriales (**BARNES 1993**).

2.4. Determinación de propiedades reológicas en los alimentos

Las propiedades reológicas se definen como propiedades mecánicas que dan como resultado la deformación y el flujo de material en presencia de una tensión (**SAHIN, SUMNU 2006**).

La determinación de las propiedades reológicas de los alimentos estudia las relaciones entre el estrés, la tensión y la escala temporal de los alimentos para comprender los efectos del procesamiento en los productos, investigar la estructura del sistema, revelar aspectos críticos de la textura de los alimentos y correlacionar sus características de textura con la evaluación sensorial (**ARANA 2012**). La reología alimentaria se define como el estudio de la deformación de las materias primas, los productos intermedios y los productos finales de la industria alimentaria (**WELTI 2002**).

Las propiedades reológicas de los fluidos biológicos pueden variar considerablemente, incluso dentro de categorías de un mismo producto, por lo tanto es importante que el comportamiento reológico sea cuidadosamente evaluado para

todos los nuevos productos. Sin datos reológicos apropiados existe poca exactitud en los cálculos para diseño de procesos o equipos (STEFFE J.F., DAUBERTH C.R. 2006)

2.4.1. Esfuerzo de corte

Este es el componente de tensión aplicado tangencial al plano sobre el cual actúa la fuerza. Se expresa en unidades de fuerza por unidad de área. Es un vector de fuerza que posee tanto magnitud como dirección (BOURNE 1982). La unidad de esta magnitud más comúnmente utilizada es el Pascal (Pa).

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

τ : Esfuerzo de corte (Pa)

F : Fuerza (N)

A : Área (m²)

2.4.2. Velocidad de corte

La velocidad de corte (γ) se define como el gradiente (velocidad espacial de cambio) del perfil de velocidades. El gradiente de la velocidad en la dirección perpendicular al flujo se denomina velocidad de cizallamiento (a veces denominado gradiente de velocidad o velocidad de deformación) (BARNES 2000). La velocidad de cizallamiento tiene las unidades de velocidad divididas por la distancia, es decir, metros por segundo / metros,

dejándonos con las unidades de segundos recíprocos (es decir, uno más), o s⁻¹. La velocidad de corte se incrementa a medida que la velocidad de la placa superior aumenta y la distancia entre las placas se hace más pequeña (BARNES 2000), ver ecuación (2.2).

$$\gamma = \frac{dy}{dt} \quad (2.2)$$

2.5. Viscosidad

Es la propiedad del líquido que define la magnitud de su resistencia debida a las fuerzas de cizalla en su interior, siendo la propiedad del líquido que más influye en las características de flujo, esto debido principalmente a las interacciones entre las moléculas del fluido (HELDMAN 1981).

Otra forma de definir la viscosidad es como la relación entre el esfuerzo de corte (τ) y la tasa de deformación (γ) adoptada por el fluido; tal como se muestra en la ecuación (2.3).

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.3)$$

μ : Viscosidad (Pa.s) o (Kg/m.s) en el S.I.

τ : Esfuerzo de corte (Pa)

γ : Velocidad de deformación (1/s)

2.5.1. Viscosidad dinámica

La viscosidad dinámica es la propiedad del fluido en virtud de la cual éste ofrece resistencia a las tensiones de cortadura. Es decir la viscosidad absoluta representa la viscosidad dinámica del líquido y es un término muy utilizado para fines prácticos.

2.5.2. Viscosidad aparente

La viscosidad aparente, se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación para fluidos de comportamiento no lineal. Este término que se utiliza al hablar de “viscosidad” para fluidos no Newtonianos.

2.5.3. Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido, ver ecuación (2.4).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.4)$$

ν : Viscosidad cinemática en centiStokes (cS)

μ : Viscosidad dinámica en Centipoise (cP)

ρ : Densidad del fluido (g/cm³)

2.6. Clasificación de los fluidos según su comportamiento reológico

Para una mayor comprensión de los problemas que se plantean en el estudio de las propiedades reológicas de los alimentos, a

continuación se presentan una clasificación de los diversos alimentos fluidos habituales, según su comportamiento reológico (Tovar, 2010).

De modo general, la mayoría de los autores coinciden al hacer una primera clasificación entre fluidos Newtonianos y no-Newtonianos, según su comportamiento reológico siga o no la Ley de Newton de la viscosidad. Además existen alimentos en los que su comportamiento depende del tiempo de actuación del esfuerzo realizado sobre ellos.

La ecuación de la Ley de Newton de viscosidad de un fluido es ecuación (2.5)

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy} \quad (2.5)$$

τ : Esfuerzo cortante (Pa)

μ : Viscosidad dinámica del fluido (Pa.s)

$\frac{du}{dy}$: Velocidad de deformación del fluido (s^{-1}) = γ

Así, la clasificación de los fluidos alimentarios según su comportamiento reológico puede establecerse de la siguiente forma:

- Fluidos Newtonianos.
- Fluidos no-Newtonianos.
 - Independientes del tiempo.

- Plásticos de Bingham.
- Pseudoplásticos.
- Dilatantes.
- Deperdientes del tiempo.
 - Fluidos tixotrópicos.
 - Fluidos reopéticos.
- Fluidos viscoelásticos.

2.7. Fluidos newtonianos

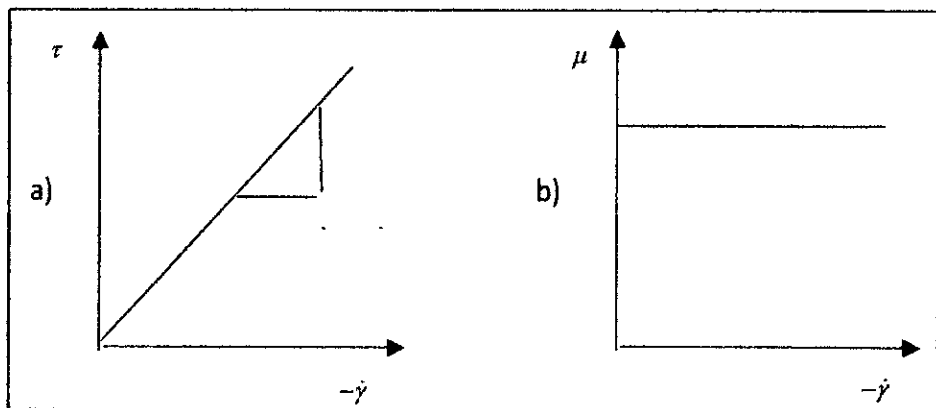
Los fluidos Newtonianos son aquellos que obedecen la ley de Newton. En estos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante τ_z y el gradiente de velocidad dv_z/dy (velocidad cortante). Esto significa que la viscosidad μ es constante e independiente de la velocidad cortante (Ramírez, 2006).

González, (2009). Para una mejor comprensión de este tipo de fluido se representan dos tipos de gráficas, la "Curva de Fluidéz" y la "Curva de Viscosidad". En la curva de fluidéz se muestra (a) el esfuerzo cortante frente a la velocidad de deformación (τ vs γ), mientras que en la curva de viscosidad se representa la viscosidad en función de la velocidad de deformación (μ vs γ). Para un fluido newtoniano estas curvas tienen la forma típica indicada en la Figura (2.1).

En el caso de los alimentos newtonianos, la viscosidad (μ) describe completamente el comportamiento reológico. Los alimentos líquidos que obedecen a esta simple relación reológica incluyen soluciones de azúcar, leche, cerveza, jugos de frutas (sin pulpa), aceites vegetales, grasas fundidas, y algunas mieles entre otras (VALENTAS 1997). Los fluidos newtonianos se pueden describir en todo el rango de $\dot{\gamma}$ a una temperatura constante por la relación:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.6)$$

Figura N° 2.1: Curvas de viscosidad para fluidos newtonianos



Fuente: Adaptado de Steffe, Rheological methods in food process engineering 1992

2.8. Fluidos no newtonianos

Un fluido no-Newtoniano es aquel cuya viscosidad (resistencia a fluir) varía con la velocidad de deformación o cizallamiento que se le aplica; es decir, se deforma en la dirección de la fuerza

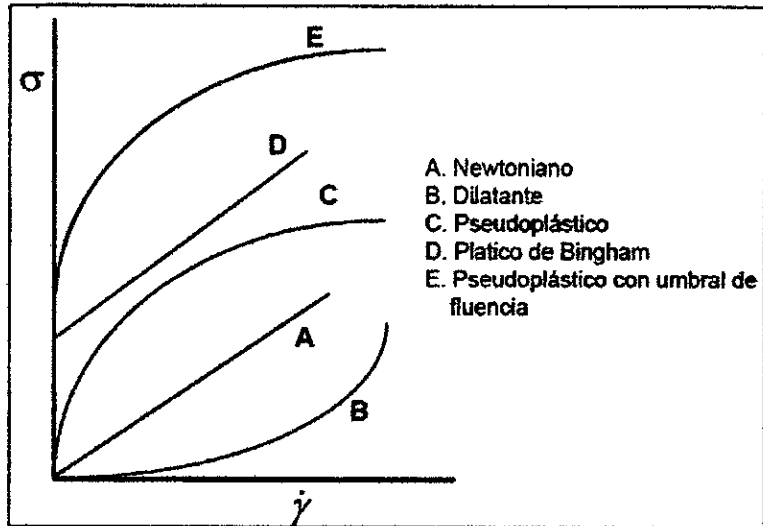
aplicada. Como resultado, un fluido no-Newtoniano no tiene un valor de viscosidad definido y constante, a diferencia de un fluido Newtoniano.

Un claro ejemplo de comportamiento no newtoniano, ampliamente documentado en bibliografía son las dispersiones hidrocoloidales. La característica prácticamente más importante de las gomas (carbohidratos), es la modificación que introducen en las propiedades reológicas de los alimentos a los que se añaden.

Por lo común, los fluidos no-Newtonianos se clasifican con respecto a su comportamiento en el tiempo, es decir, pueden ser dependientes del tiempo o independientes del mismo (Figura 2.2).

La mayoría de los alimentos de interés muestran una relación más complicada entre la velocidad de cizallamiento y el esfuerzo cortante. Ya no es factible hablar en términos de viscosidad, ya que η varía con la velocidad de cizallamiento (VALENTAS 1997).

Figura N° 2.2: Tipos de fluidos



Fuente: Adaptado de Valentas, Food engineering practice 1997.

2.8.1. Fluidos independientes del tiempo

Aquí encontramos a fluidos que necesitan de un esfuerzo umbral para iniciar el movimiento y los que no lo necesitan.

a) Fluidos sin esfuerzo umbral:

❖ Fluidos pseudoplásticos:

A medida que la velocidad de deformación aumenta, el esfuerzo de cortante y la viscosidad aparente disminuyen.

❖ Fluidos dilatantes:

A medida que la velocidad de deformación aumenta, el esfuerzo cortante aumenta.

b) Fluidos con esfuerzo umbral

Este tipo de fluido se comporta como un sólido hasta que supera un esfuerzo cortante mínimo.

Cuando el fluido supera el esfuerzo umbral: si la relación entre la velocidad de deformación y el esfuerzo cortante es lineal, se denominan fluidos de Bingham; caso contrario, no existe una relación lineal, se denominan plásticos.

2.8.2. Fluidos dependientes del tiempo

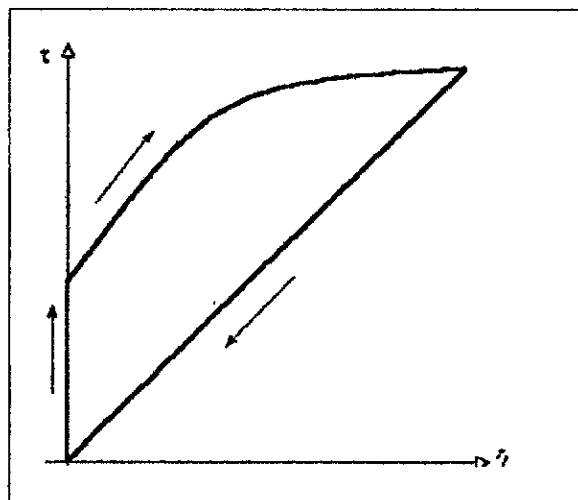
Aquí encontramos a fluidos en los que su viscosidad disminuye al aumentar el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante y los fluidos en los que la viscosidad aumenta con el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante. En ambos casos, estos fluidos regresan a su estado original luego de entrar en reposo.

a) Fluidos tixotrópicos:

Este grupo incluye aquellos alimentos que poseen una estructura cuya descomposición es función tanto del tiempo como de la TAU. A velocidad de cizallamiento constante, el valor de la tensión de corte disminuye con el tiempo mientras la estructura se derrumba. En la figura N° 2.3 se muestra un diagrama típico de un fluido tixotrópico (VALENTAS 1997).

Se caracterizan por un cambio en su estructura interna al aplicar un esfuerzo. La viscosidad disminuye al aplicar el esfuerzo por un tiempo prolongado y vuelve a aumentar cuando la fuerza cesa debido a la reconstrucción de sus estructura interna.

Figura N° 2.3. Fluidos Tixotrópicos



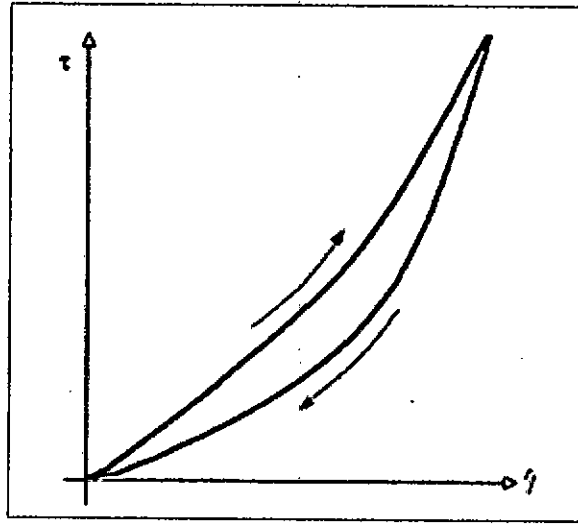
Fuente: Adaptado de Valentas, Food engineering practice 1997

b) Fluidos reopécticos

Incluye los pocos materiales que son capaces de acumular (o configuración) mientras se somete a una tensión de cizalla en constante. No se encontró alimento que siguiera este comportamiento. Sin embargo, se observó que algunos materiales asociados con el procesamiento de alimentos, como los sólidos de bentonita, se comportan como reopécticos. El comportamiento reopéctico también se representa en la figura 2.4. (VALENTAS 1997).

Se caracterizan por que su viscosidad aumenta con el tiempo y con la velocidad de deformación. Aquí también se presenta el fenómeno de histéresis.

Figura N° 2.4: Fluidos Reopécticos



Fuente: Adaptado de Valentas, Food engineering practice 1997.

2.8.3. Fluidos viscoelásticos

Se caracterizan por presentar propiedades viscosas y elásticas debido a que el líquido presenta moléculas muy largas, flexibles y a la presencia de partículas sólidas dispersas.

2.9. Parámetros reológicos en fluidos no newtonianos

2.9.1. Punto de cedencia (τ_y)

Se encuentra que el punto de cedencia es el esfuerzo cortante mínimo requerido para que se dé la deformación del fluido.

Representa el valor del esfuerzo de corte para una velocidad de deformación igual a cero. Su valor aumenta con el contenido de sólidos y disminuye con aumentos en el contenido de agua o dispersantes. Experimentalmente se muestra que el punto de cedencia para el modelo de Casson es menor que en el del modelo Plástico de Bingham.

2.9.2. Índice de flujo (n)

Indica la desviación del comportamiento reológico del fluido con respecto a los fluidos newtonianos, es decir, mientras más se aleje el valor de n de la unidad, más pronunciadas serán las características no newtonianas del fluido.

2.9.3. Índice de consistencia (K)

Caracterización numérica de la consistencia del fluido, es decir, es una medida indirecta de la viscosidad, pero sus unidades dependen de n . A medida que k aumenta el fluido se hace más espeso o viscoso.

2.10. Modelos de ajuste para comportamiento reológico de alimentos

La relación entre el esfuerzo aplicado y la tensión resultante mostrada por cualquier material alimenticio puede expresarse empíricamente o en términos de una ecuación de estado reológica, también conocida como modelo reológico. Existe un

enfoque particular en el que el comportamiento reológico de un material se analiza en una deformación simplificada denominada deformación simple o deformación uniaxial. Este enfoque es la base de muchas técnicas de medición reológica y permite el análisis de muchos materiales alimenticios (WELTI 2003).

2.10.1. Ley de potencia

Es un modelo de dos parámetros para el cual la viscosidad absoluta disminuye a medida que la tasa de corte aumenta (SARAVACOS et al. 2001). La relación entre la tasa de corte y el esfuerzo de corte está dada por la siguiente ecuación:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2.7)$$

τ : Esfuerzo cortante (Pa)

K : Índice de consistencia (Pa.sⁿ)

$\dot{\gamma}$: Velocidad de deformación (1/s)

n : Índice de flujo.

2.10.2. Modelo de Robertson Stiff

Ante la necesidad de un modelo que describa los rendimientos de un fluido pseudoplástico y que tenga la utilidad analítica del modelo de ley de potencia para los cálculos de ingeniería.

$$\tau = K_R(\dot{\gamma}_0 + \dot{\gamma})^{n_R} \quad (2.8)$$

τ : Esfuerzo cortante (Pa)

K_R : Índice de consistencia Robertson Stiff (Pa.sⁿ)

γ : Velocidad de deformación (1/s)

γ_0 : Velocidad inicial de deformación (1/s)

n_R : Índice de flujo

2.10.3. Modelo de Sisko

Este modelo plantea un comportamiento tanto newtoniano como no newtoniano para determinadas etapas de operación.

$$\tau = n_\alpha \gamma + K_S \gamma^{n_S} \quad (2.9)$$

τ : Esfuerzo cortante (Pa)

K_S : Índice de consistencia Sisko (Pa.sⁿ)

γ : Velocidad de deformación (1/s)

n_α : Viscosidad de arranque Sisko (Pa.s)

n_S : Índice de flujo

2.10.4. Modelo de Ellis

Este modelo presenta la facilidad y flexibilidad de trabajar bajo comportamiento newtoniano y no newtoniano

$$\tau = \gamma / \left[\frac{1}{n_0} + K_E \tau^{\left(\frac{1}{n_E} - 1 \right)} \right] \quad (2.10)$$

- τ : Esfuerzo cortante (Pa)
- K_E : Índice de consistencia Ellis (Pa.sⁿ)
- γ : Velocidad de deformación (1/s)
- n_0 : Viscosidad de arranque de Ellis
- n_E : Índice de flujo de Ellis

2.10.5. Modelo de Herschel Bulkley

Varios modelos son utilizados para cuantificar el esfuerzo mínimo de deformación en fluidos pseudoplásticos. Una ecuación ampliamente utilizada es la de Herschel – Bulkley (H-B) (SARAVACOS et al. 2001).

$$\tau = \tau_{0H} + K_H \gamma^{n_H} \quad (2.11)$$

- τ : Esfuerzo cortante (Pa)
- K_H : Constante de Herschel (Pa.sⁿ)
- γ : Velocidad de deformación (1/s)
- τ_{0H} : Umbral de fluencia (Pa)
- n_H : Índice de flujo

2.10.6. Modelo de Casson

La ecuación (H – B) fue modificada por Casson para determinar por extrapolación más exactamente el valor del esfuerzo mínimo de deformación (τ_0) del punto de corte en

ordenadas en especial en suspensiones (**SARAVACOS et al. 2001**).

$$\tau^{0.5} = K_{0C} + K_C \gamma^{0.5} \quad (2.12)$$

τ : Esfuerzo cortante (Pa)

K_C : Índice de consistencia Casson (Pa.s^{0.5})

K_{0C} : Constante de Casson (Pa^{0.5})

γ : Velocidad de deformación (1/s)

2.10.7. Modelo de Mizrahi-Berk

Es una modificación de la ecuación del modelo de Casson. Las constantes reológicas (K_C , n) son características de un fluido a un valor dado de temperatura y concentración (**SARAVACOS et al. 2001**).

$$\tau^{0.5} = \tau_{0M} + K_M \gamma^{n_M} \quad (2.13)$$

τ : Esfuerzo cortante (Pa)

τ_{0M} : Constante de Mizrahi-Berk (Pa^{0.5})

K_M : Índice de consistencia Mizrahi-Berk (Pa.sⁿ)

γ : Velocidad de deformación (1/s)

n_M : Índice de flujo

2.11. Método de mínimos cuadrados para los modelos reológicos

El método de mínimos cuadrados es una técnica de análisis numérico con la cual se intenta encontrar una función continua que aproxime adecuadamente un conjunto de pares ordenados.

En este trabajo se aplica el método de mínimos cuadrados para los siguientes modelos matemáticos:

Tabla N° 2.1: Modelos matemáticos

Modelo	Ecuación	Constantes	Ecuación de regresión
Ley de Potencia	$\tau = K\gamma^n$	K, n	$\hat{y}_i = Kx_i^n$
Robertson Stiff	$\tau = K_R(\gamma_0 + \gamma)^{n_R}$	K_R, γ_0, n_R	$\hat{y}_i = K_R(\gamma_0 + x_i)^{n_R}$
Casson	$\tau^{0.5} = K_{OC} + K_C\gamma^{0.5}$	K_{OC}, K_C	$\hat{y}_i = (K_{OC} + K_C x_i^{0.5})^2$
Herschel Bulkley	$\tau = \tau_{OH} + K_H\gamma^{n_H}$	τ_{OH}, K_H, n_H	$\hat{y}_i = \tau_{OH} + K_H x_i^{n_H}$
Mizrahi-Berk	$\tau^{0.5} = \tau_{OM} + K_M\gamma^{n_M}$	τ_{OM}, K_M, n_M	$\hat{y}_i = (\tau_{OM} + K_M x_i^{n_M})^2$
Sisko	$\tau = n_\alpha\gamma + K_S\gamma^{n_S}$	n_α, K_S, n_S	$\hat{y}_i = n_\alpha x_i + K_S x_i^{n_S}$
Ellis	$\tau = \frac{\gamma}{\left[\frac{1}{n_0} + K_E \tau^{\left(\frac{1}{n_E} - 1 \right)} \right]}$	n_0, K_E, n_E	$\frac{1}{n_0} \hat{y}_i + K_E \hat{y}_i^{\frac{1}{n_E}} = x_i$

Fuente: Elaboración propia

Para el modelo de Ley de Potencia:

Planteamiento de la función objetivo:

$$S = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$
$$S = \sum [y_i - Kx_i^n]^2 \quad (2.14)$$

Dónde:

- S : Función objetivo
- y_i, x_i : Datos experimentales
- K, n : Parámetros del modelo

Aplicando la condición de mínimo para la constante K :

$$\frac{dS}{dK} = 0$$
$$\frac{dS}{dK} = \sum [y_i - Kx_i^n]^2$$
$$\frac{dS}{dK} = \sum 2[y_i - Kx_i^n][x_i^n]$$
$$\frac{dS}{dK} = -2 \sum [y_i - Kx_i^n][x_i^n]$$
$$-\frac{1}{2} \frac{dS}{dK} = \sum [y_i - Kx_i^n][x_i^n] = 0 \quad (2.15)$$

Desarrollando la sumatoria de la ecuación (2.15)

$$[y_1 - Kx_1^n][x_1^n] +$$
$$[y_2 - Kx_2^n][x_2^n] +$$
$$[y_3 - Kx_3^n][x_3^n] +$$
$$\vdots$$
$$[y_{35} - Kx_{35}^n][x_{35}^n] = 0 \quad (2.16)$$

Aplicando la condición de mínimo para la constante r :

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dn} &= 0 \\ \frac{dS}{dn} &= \sum 2[y_i - Kx_i^n][y_i - Kx_i^n]' \\ \frac{dS}{dn} &= \sum 2[y_i - Kx_i^n][-Kx_i^n \ln x_i] \\ \frac{dS}{dn} &= -2 \sum [y_i - Kx_i^n][Kx_i^n \ln x_i] \\ -\frac{1}{2} \frac{dS}{dn} &= \sum [y_i - Kx_i^n][Kx_i^n \ln x_i] = 0 \end{aligned} \quad (2.17)$$

Desarrollando la sumatoria de la ecuación (2.17)

$$\begin{aligned} &[y_1 - Kx_1^n][Kx_1^n \ln x_1] + \\ &[y_2 - Kx_2^n][Kx_2^n \ln x_2] + \\ &[y_3 - Kx_3^n][Kx_3^n \ln x_3] + \\ &\vdots \\ &[y_{35} - Kx_{35}^n][Kx_{35}^n \ln x_{35}] = 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

Las ecuaciones (2.16) y (2.18) conducen a un sistema no lineal de dos variables K y r , que puede ser resuelto mediante algoritmos de solución tales como el método de Punto fijo, Newton Raphson, Gauss newton, Levenberg–Marquardt, entre otros.

Se aplicó el método de mínimos cuadrados para cada modelo reológico y en la tabla N° 2.2 se presenta el planteamiento de los sistemas de ecuaciones correspondientes para el cálculo de sus parámetros.

Tabla N°2.2: Desarrollo de mínimos cuadrados para los modelos matemáticos

Modelo	Ecuación de regresión	Función objetivo	Sistema de ecuaciones
Mizrabi-Berk	$\hat{y}_i = (\tau_{0M} + K_M x_i^{n_M})^2$	$S = \sum [y_i - (\tau_{0M} + K_M x_i^{n_M})^2]^2$	$-\frac{1}{4} \frac{dS}{d\tau_{0M}} = \sum [y_i - (\tau_{0M} + K_M x_i^{n_M})^2] [\tau_{0M} + K_M x_i^{n_M}] = 0$ $-\frac{1}{4} \frac{dS}{dK_M} = \sum [y_i - (\tau_{0M} + K_M x_i^{n_M})^2] [\tau_{0M} x_i^{n_M} + K_M x_i^{2n_M}] = 0$ $-\frac{1}{4} \frac{dS}{dn_M} = \sum [y_i - (\tau_{0M} + K_M x_i^{n_M})^2] [(\tau_{0M} + K_M x_i^{n_M})(K_M x_i^{n_M} \ln x_i)] = 0$
Herschel Bulkley	$\hat{y}_i = \tau_{0H} + K_H x_i^{n_H}$	$S = \sum [y_i - (\tau_{0H} + K_H x_i^{n_H})]^2$	$-\frac{1}{2} \frac{dS}{d\tau_{0H}} = \sum [y_i - (\tau_{0H} + K_H x_i^{n_H})] = 0$ $-\frac{1}{2} \frac{dS}{dK_H} = \sum [y_i - (\tau_{0H} + K_H x_i^{n_H})] [x_i^{n_H}] = 0$ $-\frac{1}{2} \frac{dS}{dn_H} = \sum [y_i - (\tau_{0H} + K_H x_i^{n_H})] [K_H x_i^{n_H} \ln x_i] = 0$
Sisko	$\hat{y}_i = n_\alpha x_i + K_S x_i^{n_S}$	$S = \sum [y_i - (n_\alpha x_i + K_S x_i^{n_S})]^2$	$-\frac{1}{2} \frac{dS}{dn_\alpha} = \sum [y_i - (n_\alpha x_i + K_S x_i^{n_S})] [x_i] = 0$ $-\frac{1}{2} \frac{dS}{dK_S} = \sum [y_i - (n_\alpha x_i + K_S x_i^{n_S})] [x_i^{n_S}] = 0$ $-\frac{1}{2} \frac{dS}{dn_S} = \sum [y_i - (n_\alpha x_i + K_S x_i^{n_S})] [K_S x_i^{n_S} \ln x_i] = 0$

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°2.2: Desarrollo de mínimos cuadrados para los modelos matemáticos (continuación)

Ley de Potencia	$\hat{y}_i = Kx_i^n$	$S = \sum [y_i - Kx_i^n]^2$	$-\frac{1}{2} \frac{dS}{dK} = \sum [y_i - Kx_i^n][x_i^n] = 0$ $-\frac{1}{2} \frac{dS}{dn} = \sum [y_i - Kx_i^n][Kx_i^n \ln x_i] = 0$
Robertson Stiff	$\hat{y}_i = K_R(\gamma_0 + x_i)^{n_R}$	$S = \sum [y_i - K_R(\gamma_0 + x_i)^{n_R}]^2$	$-\frac{1}{2} \frac{dS}{dK_R} = \sum [y_i - K_R(\gamma_0 + x_i)^{n_R}][(\gamma_0 + x_i)^{n_R}] = 0$ $-\frac{1}{2} \frac{dS}{d\gamma_0} = \sum [y_i - K_R(\gamma_0 + x_i)^{n_R}][K_R n_R (\gamma_0 + x_i)^{n_R - 1}] = 0$ $-\frac{1}{2} \frac{dS}{dn_R} = \sum [y_i - K_R(\gamma_0 + x_i)^{n_R}][K_R (\gamma_0 + x_i)^{n_R} \ln(\gamma_0 + x_i)] = 0$
Casson	$\hat{y}_i = (K_{0C} + K_C x_i^{0.5})^2$	$S = \sum [y_i - (K_{0C} + K_C x_i^{0.5})^2]^2$	$-\frac{1}{4} \frac{dS}{dK_{0C}} = \sum [y_i - (K_{0C} + K_C x_i^{0.5})^2][K_{0C} + K_C x_i^{0.5}] = 0$ $-\frac{1}{4} \frac{dS}{dK_C} = \sum [y_i - (K_{0C} + K_C x_i^{0.5})^2][(K_{0C} + K_C x_i^{0.5})x_i^{0.5}] = 0$
Ellis	$\frac{1}{n_0} \hat{y}_i + K_E \hat{y}_i^{\frac{1}{n_E}} = x_i$	$S = \sum (x_i - \frac{1}{n_0} y_i + K_E y_i^{\frac{1}{n_E}})^2$	$\frac{1}{2} \frac{dS}{dn_0} = \sum (x_i - \frac{1}{n_0} y_i + K_E y_i^{\frac{1}{n_E}}) (\frac{1}{n_0^2} y_i) = 0$ $\frac{1}{2} \frac{dS}{dK_E} = \sum (x_i - \frac{1}{n_0} y_i + K_E y_i^{\frac{1}{n_E}}) (y_i^{\frac{1}{n_E}}) = 0$ $-\frac{1}{2} \frac{dS}{dn_E} = \sum (x_i - \frac{1}{n_0} y_i + K_E y_i^{\frac{1}{n_E}}) (\frac{K_E}{n_E^2} y_i^{\frac{1}{n_E}} \ln y_i) = 0$

Fuente: Elaboración propia

2.12. Determinación de la viscosidad

2.12.1. Viscosidad aparente

A partir de la ecuación del modelo se realizan operaciones algebraicas para encontrar la función $f(n)$ que cumpla la siguiente condición:

$$\tau = f(n)\gamma \quad (2.19)$$

$$\mu_{ap} = f(n) \quad (2.20)$$

Donde $f(n)$ es la expresión para el cálculo de la viscosidad aparente.

Para el modelo de Ley de potencia:

Partiendo de la ecuación modelo:

$$\tau = K\gamma^n$$

La función correspondiente a $\mu_{ap} = f(n)$ resulta:

$$\mu_{ap} = K\gamma^{n-1} \quad (2.21)$$

μ_{ap} : Viscosidad aparente [Pa.s]

K : Índice de consistencia [Pa.sⁿ]

n : Índice de flujo

2.12.2. Viscosidad diferencial

Dada la ecuación de modelo, se calcula la primera derivada de τ con respecto a γ .

$$\mu_{dif} = \frac{d\tau}{d\gamma} \quad (2.22)$$

Para el modelo de Ley de potencia

Partiendo de la ecuación modelo

$$\tau = K\gamma^n$$

Derivando el segundo miembro con respecto a γ se tiene:

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = Kn\gamma^{n-1}$$

$$\mu_{dif} = Kn\gamma^{n-1} \quad (2.23)$$

μ_{dif} : Viscosidad aparente [Pa.s]

K : Índice de consistencia [Pa.sⁿ]

n : Índice de flujo

A continuación se presenta una tabla resumen con las ecuaciones correspondientes para la viscosidad aparente y diferencial de cada modelo.

2.12. Determinación de la viscosidad

2.12.1. Viscosidad aparente

A partir de la ecuación del modelo se realizan operaciones algebraicas para encontrar la función $f(n)$ que cumpla la siguiente condición:

$$\tau = f(n)\gamma \quad (2.19)$$

$$\mu_{ap} = f(n) \quad (2.20)$$

Donde $f(n)$ es la expresión para el cálculo de la viscosidad aparente.

Para el modelo de Ley de potencia:

Partiendo de la ecuación modelo:

$$\tau = K\gamma^n$$

La función correspondiente a $\mu_{ap} = f(n)$ resulta:

$$\mu_{ap} = K\gamma^{n-1} \quad (2.21)$$

μ_{ap} : Viscosidad aparente [Pa.s]

K : Índice de consistencia [Pa.sⁿ]

n : Índice de flujo

Tabla N° 2.3: Viscosidad aparente y viscosidad diferencial

Modelo	Ecuación	Viscosidad aparente	Viscosidad diferencial
Ley de potencia	$\tau = K\gamma^n$	$\mu_{ap} = K\gamma^{n-1}$	$\mu_{dif} = Kn\gamma^{n-1}$
Robertson Stiff	$\tau = K_R(\gamma_0 + \gamma)^{n_R}$	$\mu_{ap} = K_R(\gamma_0 + \gamma)^{n_R-1} \left(\frac{\gamma_0}{\gamma} + 1 \right)$	$\mu_{dif} = K_R n_R (\gamma_0 + \gamma)^{n_R-1}$
Casson	$\tau^{0.5} = K_{0C} + K_C \gamma^{0.5}$	$\mu_{ap} = (K_{0C} + K_C \gamma^{0.5}) \left(\frac{K_{0C}}{\gamma} + \frac{K_C}{\gamma^{0.5}} \right)$	$\mu_{dif} = (K_{0C} + K_C \gamma^{0.5}) \frac{K_C}{\gamma^{0.5}}$
Herschel Bulkley	$\tau = \tau_{0H} + K_H \gamma^{n_H}$	$\mu_{ap} = \frac{\tau_{0H}}{\gamma} + K_H \gamma^{n_H-1}$	$\mu_{dif} = K_H n_H \gamma^{n_H-1}$
Mizrahi-Berk	$\tau^{0.5} = \tau_{0M} + K_M \gamma^{n_M}$	$\mu_{ap} = (\tau_{0M} + K_M \gamma^{n_M}) \left(\frac{\tau_{0M}}{\gamma} + K_M \gamma^{n_M-1} \right)$	$\mu_{dif} = 2(\tau_{0M} + K_M \gamma^{n_M}) K_M n_M \gamma^{n_M-1}$
Sisko	$\tau = n_\alpha \gamma + K_S \gamma^{n_S}$	$\mu_{ap} = n_\alpha + K_S \gamma^{n_S-1}$	$\mu_{dif} = n_\alpha + K_S n_S \gamma^{n_S-1}$
Ellis	$\tau = \frac{\gamma}{\left[\frac{1}{n_0} + K_E \tau^{\left(\frac{1}{n_E} - 1 \right)} \right]}$	$\mu_{ap} = \frac{1}{\frac{1}{n_0} + K_E \tau^{\left(\frac{1}{n_E} - 1 \right)}}$	$\mu_{dif} = \frac{1}{\frac{1}{n_0} + \frac{K_E}{n_E} \tau^{\left(\frac{1}{n_E} - 1 \right)}}$

Fuente: Elaboración propia

2.13. Variables que influyen en la viscosidad

Las variables más importantes que afectan a la viscosidad son:

- a) Concentración
- b) Temperatura
- c) Presión

2.13.1. Variación de la viscosidad con la concentración

La viscosidad de un compuesto depende fuertemente de la concentración. Según BOURNE (1982), la relación entre la concentración de sólidos solubles y la viscosidad, pero no lineal a temperatura constante.

Se han descrito dos tipos de correlaciones o modelos matemáticos para considerar el efecto de la concentración en la viscosidad (SARAVACOS, 2001; RAO et al., 2014), una según un modelo potencial:

$$\eta = K_1 C^A \quad (2.24)$$

Y un modelo exponencial:

$$\eta = K_2 \exp(A_2 C) \quad (2.25)$$

En estas ecuaciones K_1 , K_2 , A_1 y A_2 son constantes y C es el contenido en sólidos solubles del fluido expresado en °Brix.

Estas ecuaciones también son válidas para estudiar el efecto de la concentración en el índice de consistencia.

2.13.2. Variación de la viscosidad con la temperatura

La viscosidad disminuye con la temperatura. Existen varias fórmulas que permiten evaluar la variación de la viscosidad de un líquido al cambiar la temperatura. Las más importantes son:

La ecuación de Arrhenius:

$$\mu_{ap} = \mu_{ap0} e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2.26)$$

Siendo, μ , la viscosidad dinámica (Pa.s), T, es la temperatura absoluta (K), E_a es la energía de activación (KJ) y μ_{ap0} es la constante de viscosidad aparente para el fluido.

2.13.3. Variación de la viscosidad con la presión

La viscosidad en líquidos aumenta exponencialmente con la presión. Excepcionalmente, para el agua a temperaturas menores de 30° C la viscosidad disminuye. Los cambios de viscosidad con la presión son bastante pequeños para presiones distintas de la atmosférica.

Para la mayoría de los casos prácticos, el efecto de la presión se ignora a la hora de hacer mediciones con el viscosímetro o reómetro.

2.14. Determinación de la energía de activación

Para el cálculo de la energía de activación se realizaron los siguientes pasos

Partiendo de la ecuación de Arrhenius

$$\mu_{ap} = \mu_{ap0} e^{\frac{Ea}{RT}} \quad (2.27)$$

Se desarrolló una expresión lineal para el cálculo de la energía de activación

$$\ln(\mu_{ap}) = \ln(\mu_{ap0}) - \frac{Ea}{RT} \quad (2.28)$$

Organizando los términos de la ecuación (2.25)

$$\ln(\mu_{ap}) = -\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + \ln(\mu_{ap0}) \quad (2.29)$$

La ecuación anterior es comparable con:

$$y = mx + b \quad (2.30)$$

Se generó los siguientes cambios de variables:

$$y = \ln(\mu_{ap}) \quad (2.31)$$

$$x = \left(\frac{1}{T} \right) \quad (2.32)$$

Para cada valor de °Brix dado se requiere organizar los datos de viscosidad aparente en función a la temperatura. En la tabla N° 2.4 se presenta la forma de organizar los datos previos al cálculo.

Tabla N° 2.4: Esquema para el cálculo de energía de activación

Z °Brix					
γ_1		γ_2		γ_n	
1/T (1/K)	LN (μ_{ap})	1/T (1/K)	LN (μ_{ap})	1/T (1/K)	LN (μ_{ap})
1/T ₁	LN (μ_{ap1})	1/T ₁	LN (μ_{ap1})	1/T ₁	LN (μ_{ap1})
1/T ₂	LN (μ_{ap2})	1/T ₂	LN (μ_{ap2})	1/T ₂	LN (μ_{ap2})
1/T ₃	LN (μ_{ap3})	1/T ₃	LN (μ_{ap3})	1/T ₃	LN (μ_{ap3})
1/T ₄	LN (μ_{ap4})	1/T ₄	LN (μ_{ap4})	1/T ₄	LN (μ_{ap4})
1/T ₅	LN (μ_{ap5})	1/T ₅	LN (μ_{ap5})	1/T ₅	LN (μ_{ap5})
1/T ₆	LN (μ_{ap6})	1/T ₆	LN (μ_{ap6})	1/T ₆	LN (μ_{ap6})

Fuente. Elaboración propia

Los datos temperatura y viscosidad aparente se transforman con las ecuaciones (2.28) y (2.29). Realizando el ajuste lineal para la ecuación (2.27) se obtienen la pendiente m y el intercepto b:

$$m = -\frac{Ea}{R}$$

$$Ea = -mR \quad (2.33)$$

$$b = \ln(\mu_{ap0})$$

$$\mu_{ap0} = e^b \quad (2.34)$$

Utilizando la ecuación (2.33) se calcula la energía de activación E_a (KJ), con $R = 8.3144\text{J/mol-K}$, y la constante μ_{ap0} (Pa.s), mediante la ecuación (2.34).

2.15. Parámetros estadísticos para la evaluación de los modelos reológicos

Índice de correlación

Mide el grado de relación entre la variable de respuesta y sus variables de predicción. Cuanto mayor sea el R^2 , mejor será el modelo que se ajuste a los datos. R^2 siempre está entre 0 y 100%.

El índice de correlación se calcula mediante:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.35)$$

Donde

y_i : Datos experimentales

\bar{y} : Media de los datos experimentales

\hat{y}_i : Valor proyectado del modelo

Los valores proyectados \hat{y}_i se calculan de acuerdo al modelo reológico en estudio.

MSE

El error medio cuadrado (Mean Square Error) es la varianza alrededor de la línea de regresión ajustada, se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

$$MSE = S^2 \quad (2.36)$$

$$S = \sqrt{\frac{SSE}{N - P}} \quad (2.37)$$

$$SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.38)$$

Donde

MSE : Mean Square Error, varianza asociada a la regresión

S : Desviación estándar asociada al error en el modelo de regresión

SSE : Suma de cuadrados residuales

N : Número de observaciones

P : Número de parámetros libres

Los residuales se calculan para cada punto y_i por diferencia con el valor proyectado del modelo \hat{y}_i .

2.16. Equipos de medición de viscosidad

2.16.1. Reómetro RheoLab QC

La configuración de las pruebas se puede seleccionar entre controlar la velocidad de corte (CR) y el control del esfuerzo de corte (CS). Esta opción, junto con la amplia velocidad e intervalos de torque y tiempos cortos de respuesta del motor, crean innumerables beneficios en aplicación. Así como pruebas convencionales de curvas de flujo y viscosidad, el RheoLab QC es también ideal para la investigación del comportamiento de emulsiones y dispersiones en mezclado y agitación, para pruebas de cedencia y estabilidad de recubrimientos, y para la determinación del "yield point" en geles y pastas.

Figura N° 2.5: Reómetro Rheolab QC



Fuente: Laboratorio de Investigación FIQ -UNAC

2.17. Definiciones de términos básicos

2.17.1. Fluido:

Sustancias que están en estado líquido o gaseoso.

2.17.2. Fluido no newtoniano

Son todos aquellos fluidos que no exhiben una relación directa entre el esfuerzo y la velocidad de corte.

2.17.3. Reología

Estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos.

2.17.4. Reometría

Describe los métodos de medida y los instrumentos que permiten obtener datos reológicos de un material. Determina las relaciones cuantitativas y cualitativas entre la deformación y el esfuerzo.

2.17.5. Esfuerzo de corte

Es la fuerza por unidad de área tangencial al movimiento del fluido.

2.17.6. Velocidad de deformación

Referente al movimiento de una fracción del material por unidad de tiempo producto de un esfuerzo de corte.

2.17.7. Viscosidad aparente

Índice de consistencia, aplicado a fluidos no newtonianos. Se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación.

2.17.8. Modelo reológico

Construcción matemática abstracta y simplificada que describe el fenómeno reológico de un fluido.

2.17.9. Índice de consistencia

Medida indirecta de la viscosidad, depende del índice de comportamiento de flujo.

2.17.10. Índice de comportamiento de flujo

Desviación del comportamiento reológico con respecto a los fluidos newtonianos.

2.17.11. Zumo

Líquido de las hierbas, flores, frutas u otras cosas semejantes, que se saca exprimiéndolas o majándolas.

2.17.12. Pseudoplástico

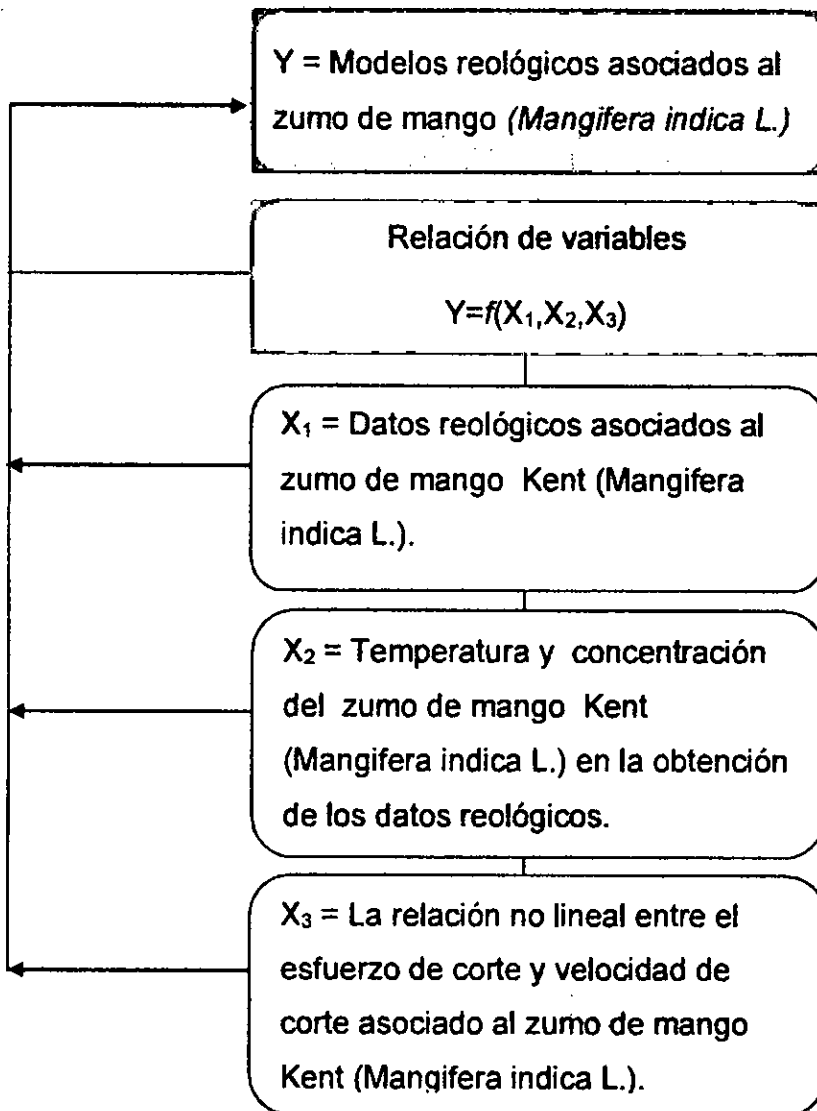
Característica de un fluido no newtoniano en la cual su viscosidad se reduce con el gradiente de esfuerzo de corte.

2.17.13. Reograma

Representación gráfica del comportamiento reológico de un fluido, esfuerzo de corte frente a velocidad de corte.

III. VARIABLES E HIPÓTESIS

3.1. Definición de las variables de la investigación



3.2. Operacionalización de las variables

Variable	Dimensiones	Indicadores	Método
Y = Modelos reológicos asociados al zumo de mango Kent (Mangifera indica L.).	Reproducibilidad de los datos experimentales mediante los modelos reológicos asociados al comportamiento del zumo de mango Kent (Mangifera indica L.).	Los índices de correlación múltiple y análisis de la varianza.	- Análisis estadístico - Gráfico - Revisión bibliográfica
Variabes	Dimensiones	Indicadores	Método
X ₁ = Datos reológicos asociados al zumo de mango Kent (Mangifera indica L.).	Características inherentes del fluido.	- Velocidad de corte - Esfuerzo de corte	- Diseño experimental - Revisión bibliográfica
X ₂ = Temperatura y concentración del zumo de mango Kent (Mangifera indica L.) en la obtención de los datos reológicos.	Variabes de proceso para la obtención de los datos reológicos.	- °C - °Brix	- Ensayos de laboratorio - Revisión bibliográfica
X ₃ = La relación no lineal entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte asociado al zumo de mango Kent (Mangifera indica L.).	Análisis de la relación entre la velocidad de corte y esfuerzo de corte.	- Diferencias respecto a la relación lineal. - Índice de correlación y varianza	- Análisis estadístico - Revisión bibliográfica.

3.3. Hipótesis general e hipótesis específicas

Hipótesis General

El zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L) tiene un comportamiento reológico característico de los fluidos pseudoplásticos.

Hipótesis Específicas

- a. Los datos reológicos del zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.) se obtienen con el reómetro rotacional mediante un batch de ensayos reológicos a temperatura y concentración definida.
- b. La temperatura y la concentración influyen significativamente en los valores de esfuerzo de corte y velocidad de corte asociados al zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.).
- c. Existe una relación no lineal entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte asociado al zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.).

IV. METODOLOGIA

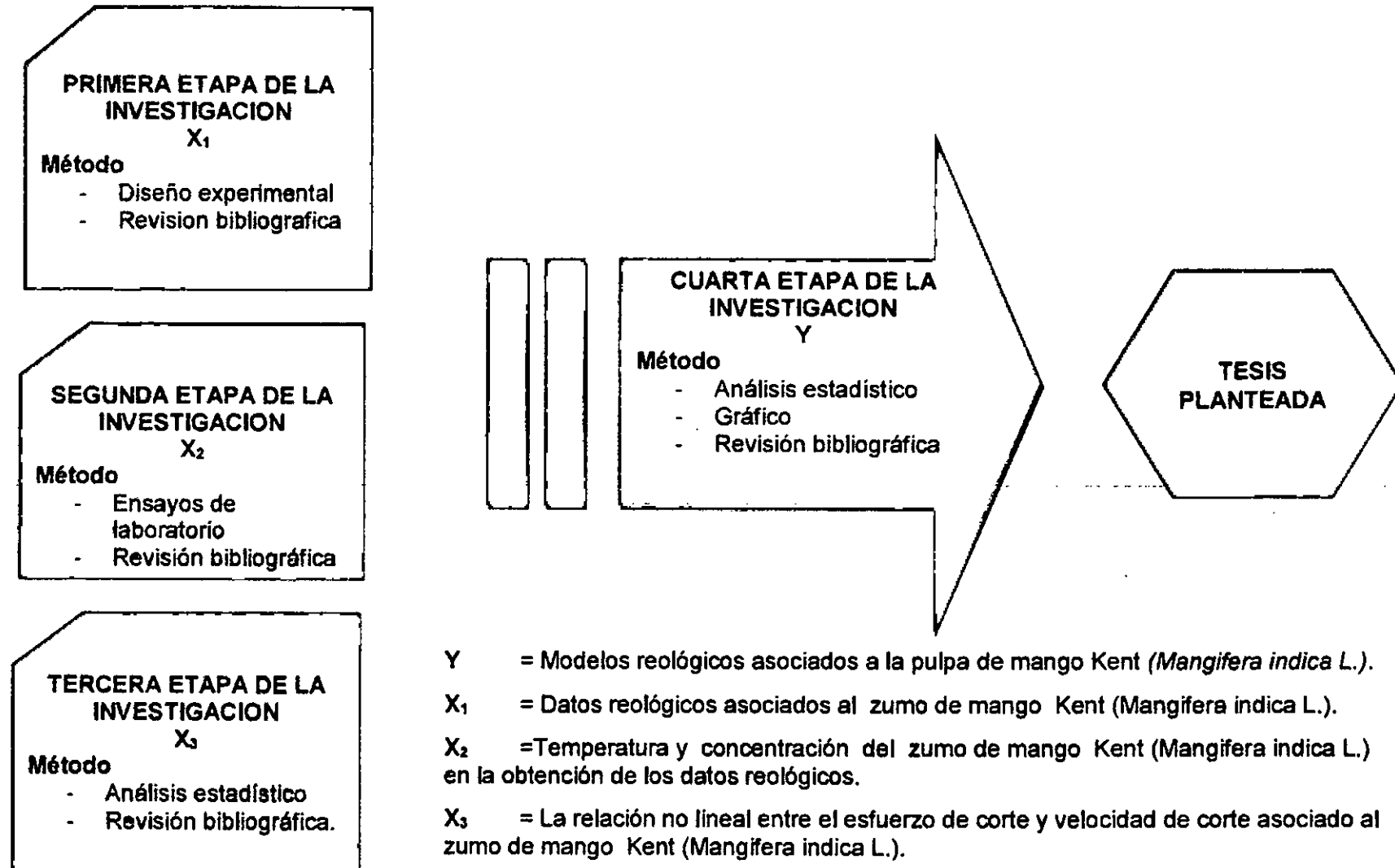
4.1. Tipo de investigación

El presente proyecto de investigación se centra en la descripción del fenómeno reológico mediante un modelo matemático al cual denominaremos modelo reológico.

El perfil de investigación tiene los siguientes niveles: aplicada, experimental, cuantitativa, descriptiva y a nivel de laboratorio

- a. Es aplicada porque los modelos reológicos permiten optimizar procesos referidos al flujo de fluidos, cálculo de potencias, diseño de equipos, etc.
- b. Es experimental porque se realizará una serie de corridas de acuerdo a un diseño experimental.
- c. Es descriptiva porque mediante los modelos reológicos se describe el comportamiento reológico del zumo de mango.
- d. Es a nivel laboratorio porque las pruebas reológicas serán llevadas a cabo en el laboratorio.

4.2. Diseño de la investigación



4.3. Población y muestra

Población: La población fue 10 Kg de Mango Kent (*Mangífera indica* L.) procedentes del norte de Perú (Piura, Lambayeque y Ancash). Cosechado entre los meses de enero y marzo del 2017. Compradas en el Mercado Mayorista N° 2 de frutas – Lima, con el cual se obtiene 6497 cm³ de zumo.

Muestra: Se utilizó 6 Kg de fruto mango Kent (*Mangífera indica* L.) maduro y en buen estado de conservación, el cual fue transformado en zumo para realizar la experimentación tal como se indica en la sección 4.4.4.

4.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.4.1. Lugar de ejecución

Las pruebas experimentales se realizaron en el Laboratorio de Investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao, (Bellavista, Callao. Perú)

4.4.2. Técnica de recolección de datos

a. Tratamiento físico

La preparación de muestra se realizó mediante una serie de operaciones detalladas en el ítem 4.4.4.

b. Obtención de las muestras de ensayo

La muestra matriz se sometió a diluciones consecutivas a fin de obtener diferentes niveles de °Brix para los ensayos.

c. Análisis cuantitativo

Medición del esfuerzo cortante a temperatura controlada mediante un sistema de enfriamiento, llevado a cabo en el reómetro RheoLab QC, con el cual se obtienen los reogramas para cada ensayo, que serán explicados y detallados más adelante.

d. Análisis matemático

Se aplicó el método de mínimos cuadrados para la regresión de cada modelo estudiado, y se calculó el índice de correlación y la varianza asociada.

4.4.3. Instrumentos de recolección de datos

a. Materia prima

- Mango Kent (*Mangifera indica* L.)

b. Materiales

- Bagueta
- Lunas de reloj
- Vasos de precipitado de 100, 250, 500 y 1000 ml
- Tamiz
- Probeta de 25 ml y 100 ml

- Cuchillos
- Espátula
- Icepack

c. Equipos

- Balanza analítica.
- Reómetro Rheolab QC .
- Refractómetro.
- Potenciómetro.
- Termómetro.
- Termorregulador.

d. Reactivos y/o solventes

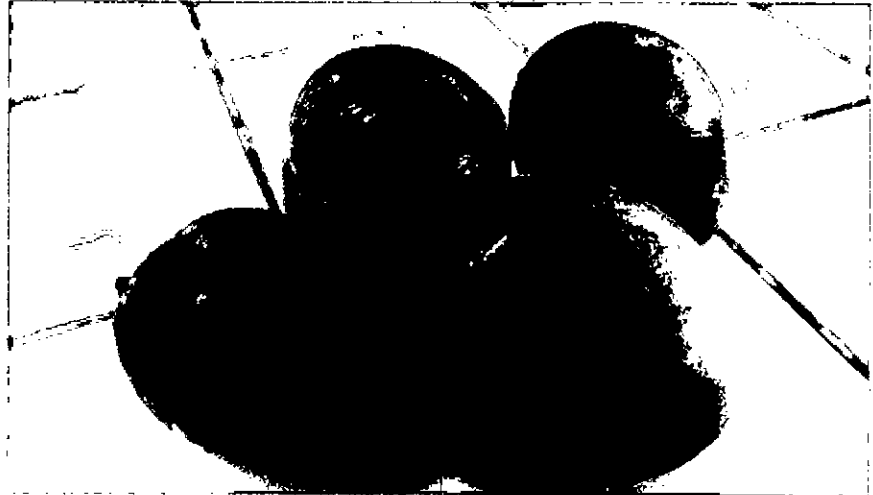
- Agua tratada.

4.4.4. Procedimiento de recolección de datos.

a. Identificación de la materia prima

La materia prima para los ensayos fueron los frutos de mango Kent (*Mangifera indica L.*) provenientes del norte del Perú (Piura, Lambayeque y Ancash). Recopilados entre los meses de Marzo y Junio del 2017. Obtenidas en el Mercado Mayorista N° 2 de frutas – Lima.

Figura N° 4.1: Mango Kent (*Mangifera indica* L)



Fuente: Elaboración propia

b. Clasificación taxonómica de la materia prima

Para obtener una mayor exactitud con respecto al mango en estudio, se realizó una clasificación taxonómica en el Museo de Historia Natural de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, División Botánica.

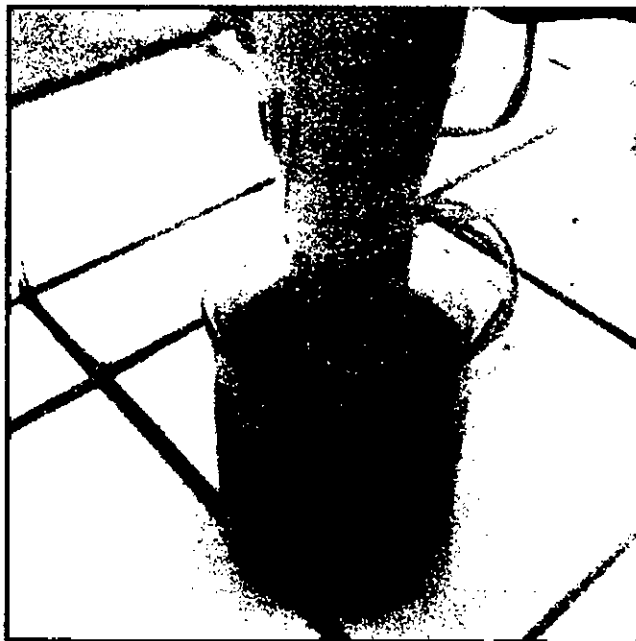
c. Extracción del zumo de mango Kent

Para la extracción del zumo se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- i. Los frutos de mango Kent (*Mangifera indica* L.) fueron recepcionadas y separadas en función a su apariencia y grado de maduración.

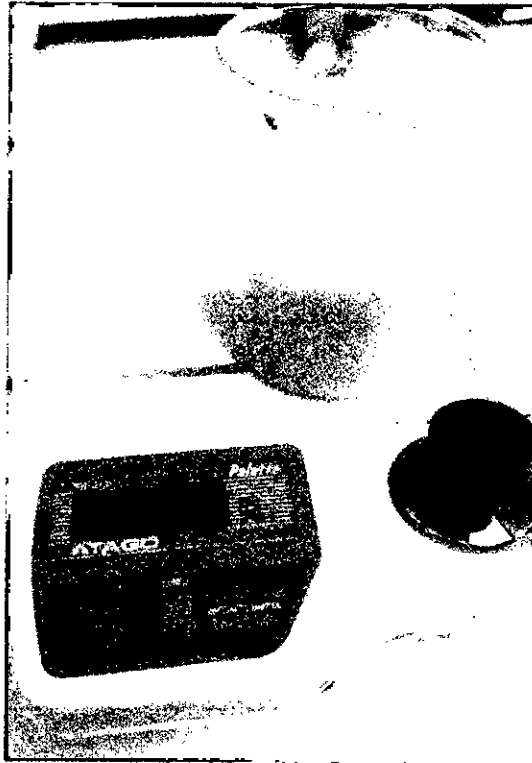
- ii. **Desinfección con agua clorada:** La materia prima fue sumergida en un volumen de 5 L de agua clorada (5ppm), durante 15 min.
- iii. **Pesaje:** Las frutas fueron enjuagas y secadas superficialmente para proceder con su pesaje.
- iv. **Licuada:** La cascara de la fruta fue desprendida con un cuchillo de filo notable manteniendo un grosor uniforme. La pulpa de la fruta fue separada del hueso y vertida en un recipiente de 1 L para ser licuada.
- v. **Se midió el pH y los °Brix de la muestra obtenida.**

Figura N° 4.2: Extracción del zumo de mango



Fuente: Elaboración propia

Figura N°4.3: Medición de °Brix



Fuente: Elaboración propia

d. Concentración del zumo de mango Kent

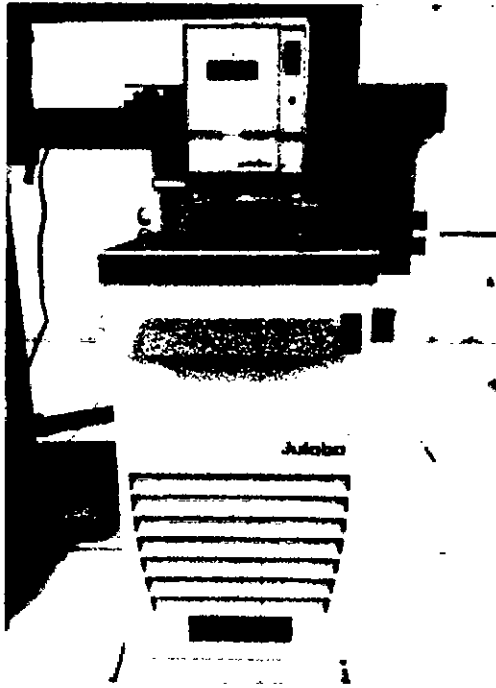
De acuerdo al diseño experimental, las muestras de zumo de mango fueron ajustadas entre 13.5, 15.5 y 17.1 °Brix. Esto fue posible mediante la adición de agua tratada previo cálculo, los cuales serán explicados posteriormente.

e. Control de la temperatura de ensayo

De acuerdo al diseño experimental por bloques, las muestras de zumo de mango fueron analizadas a las temperaturas de

10, 20, 30, 40, 50 y 60 °C, lo cual fue posible mediante el uso del termostato (sistema de enfriamiento/calentamiento).

Figura N° 4.4: Termostato



Fuente: Elaboración propia

f. Preparación del Reómetro Rheolab QC

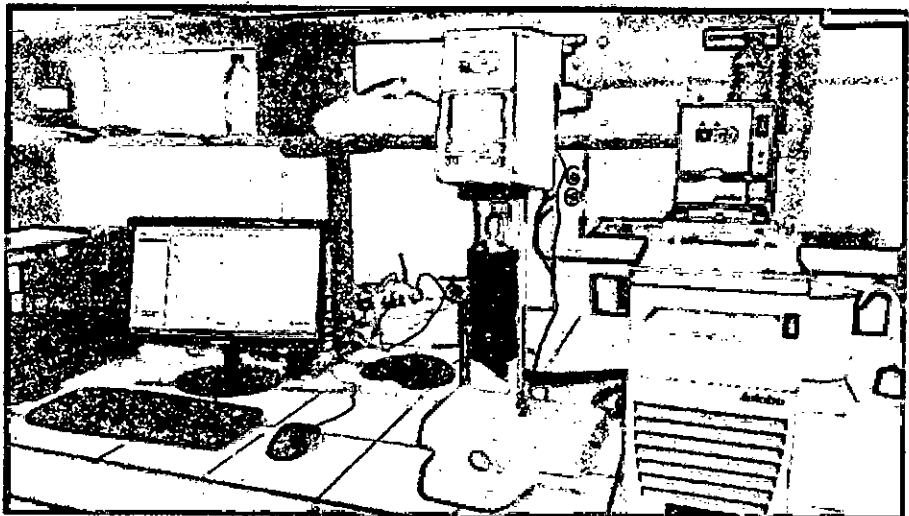
Se realizaron los ensayos partiendo desde 10°C hasta los 60 °C, temperatura límite a la cual las muestras de zumo empiezan a sufrir cambios en su composición.

Se realizaron los siguientes pasos:

- i. Instalación del usillo, de acuerdo al tipo de fluido el usillo empleado fue el "CX27/S 38076", el cual soporta mediciones en mezclas con partículas.

- ii. Instalación del recipiente de medición, de acuerdo al usillo empleado y al fluido en estudio, el recipiente empleado fue el "CUP-C-CC39/SS", de 70 cm³ de capacidad.
- iii. Conexión al ordenador, el reómetro permite la operación desde el ordenador mediante el software RHEOPLUS, para lo cual conectamos el terminal USB del equipo al ordenador.
- iv. Conexión del termorregulador, el recipiente de medición está diseñado para trabajar con un sistema de enfriamiento/ calentamiento. Este fue encendido y programado para empezar desde 10 °C.

Figura N° 4.5: Sistema de medición de reología



Fuente: Elaboración propia

g. Determinación de los datos reológicos asociados al zumo de mango Kent

Para obtener los datos reológicos asociados al zumo de mango Kent se utilizó el diseño experimental por bloques 3x6, en el cual se estudia la interacción de la concentración y la temperatura según lo reflejado en el siguiente cuadro:

Tabla N° 4.1: Diseño de experimentación por bloques

Tratamientos	Factores		Resultados: Txy'
	T (°C)	°Brix	
1	10	13.5	Txy 1
2	10	15.5	Txy 2
3	10	17.1	Txy 3
4	20	13.5	Txy 4
5	20	15.5	Txy 5
6	20	17.1	Txy 6
7	30	13.5	Txy 7
8	30	15.5	Txy 8
9	30	17.1	Txy 9
10	40	13.5	Txy 10
11	40	15.5	Txy 11
12	40	17.1	Txy 12
13	50	13.5	Txy 13
14	50	15.5	Txy 14
15	50	17.1	Txy 15
16	60	13.5	Txy 16
17	60	15.5	Txy 17
18	60	17.1	Txy 18

Txy': Tabla de datos esfuerzo de corte velocidad de corte

Fuente: Elaboración propia

Se realizaron los siguientes pasos:

- a. La temperatura del termorregulador se graduó en 10° C.
- b. Se agregó el zumo de concentración 13.5°Brix en el recipiente de medición y se acopló al reómetro.
- c. En el ordenador, se dio inicio a la lectura de los datos Txy con el software Rheoplus.
- d. Los datos Txy fueron registrados digitalmente.
- e. Para empezar una nueva medición se retiró la muestra y enjuagó el recipiente de medición.
- f. Se llevaron a cabo los pasos b. hasta e. para las concentraciones 15.5 y 17.1°Brix respectivamente.
- g. Se llevaron a cabo los pasos a. hasta f. para las temperaturas 20, 30, 40, 50 y 60 °C respectivamente.
- h. Determinación de la relación numérica para los datos experimentales Txy**

La información obtenida es procesada para cada modelo en estudio. De acuerdo a los siguientes pasos:

1. Elaboración de los reogramas: Se plotearon los datos experimentales Esfuerzo de corte τ [Pa] – Velocidad de corte $\dot{\gamma}$ [1/s].
2. De acuerdo a las características de los reogramas se realizó la clasificación reológicas del fluido en estudio.

3. Determinado la clase de fluido, se aplicó el método de mínimos cuadrados para la regresión no lineal de cada uno de los siguientes modelos:
 - Modelo de ley de potencia
 - Modelo de Robertson Stiff
 - Modelo de Casson
 - Modelo de Herschel Bulkley
 - Modelo de Mizrahi–Berk
 - Modelo de Sisko
4. Para cada modelo se calcularon los parámetros característicos, se evaluó el índice de correlación y la varianza a fin de seleccionar el modelo que mejor representa los datos experimentales.
5. Se realizó la comparación de los parámetros estadísticos obtenidos de cada modelo a fin de seleccionar el que mejor predice el comportamiento reológico del zumo de mango Kent.
6. Se calculó la viscosidad aparente y la energía de activación a fin de representar el comportamiento reológico del fluido.

4.5. Procedimiento de recolección de datos

4.5.1. Fuentes primarias

En el Laboratorio de Investigación FIQ – UNAC se realizaron las operaciones físicas para el tratamiento de la materia prima, la extracción del zumo y la determinación de los datos reológicos asociados al zumo de mango Kent.

4.5.2. Fuentes secundarias

Para un óptimo desarrollo de la experimentación se utilizaron fuentes bibliográficas, revistas científicas, manuales de equipos, tesis, etc.

Además se llevó la materia a la UNMSM para su clasificación.

4.6. Procesamiento y análisis de datos

Se realizaron 18 combinaciones basadas en el diseño experimental por bloques 3x6, ver tabla N° 4.1.

Mediante el software Rheoplus se obtuvieron las lecturas de los datos reológicos del zumo de mango Kent analizadas en el reómetro Rheolab QC.

Se aplicó el método de mínimos cuadrados para la correlación de los datos experimentales.

Se utilizó el software Excel y Minitab 16 para las correlaciones y la evaluación estadística.

V. RESULTADOS

5.1. Extracción del zumo de mango Kent

Durante la extracción del zumo se realizaron ensayos físicos y químicos tomando porciones de 1Kg de fruto mango Kent.

Tabla N° 5.1: Características fisicoquímicas de la materia prima

n°	Fruto (g)	zumo obtenido (g)	relación zumo/fruto	Volumen (cm ³)	Densidad zumo (g/cm ³)	pH	°Brix
1	1000	703.0	0.703	650	1.0815	3.5	17
2	1000	698.0	0.698	650	1.0738	3.6	17.1
3	1000	700.0	0.700	650	1.0769	3.6	17.1

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo la relación promedio P/P: zumo / fruto de: 0.700

Se obtuvo la densidad promedio del zumo de: 1.0774 g / cm³

El °Brix promedio de la muestra fue: 17.1 °Brix

El pH promedio de la muestra fue: pH = 3.6

Cada corrida necesita 70cm³ zumo → se requiere en total:

$$\text{Fruto(g)} = \frac{1}{0.7} \times \frac{1.0774\text{g}}{\text{cm}^3} \times \frac{70\text{cm}^3}{\text{ensayo}} \times 18 \times 3 = 5817.96\text{g}$$

$$\text{Fruto (Kg)} \approx 6\text{Kg}$$

5.2. Concentración del zumo de mango Kent

Partiendo de la muestra base de zumo con concentración 17.1

°Brix y la equivalencia:

$$1^{\circ}Brix = \frac{1g_{azúcar}}{100g_{solucion}}$$

Se utilizó la siguiente ecuación para las diluciones del zumo de mango Kent:

$$m_2 = \frac{^{\circ}Brix_1}{^{\circ}Brix_2} m_1 \quad (5.1)$$

$$m_{agua} = m_2 - m_1 \quad (5.2)$$

Tabla N° 5.2: Diluciones del zumo de mango Kent

n°	Zumo base		→	Zumo diluido	
	m1 (g)	°Brix1	m agua (g)	m2 (g)	°Brix2
1	703.0	17,1	0	703.0	17,1
2	698.0	17,1	72.1	770.1	15,5
3	700.0	17,1	186.7	886.7	13,5

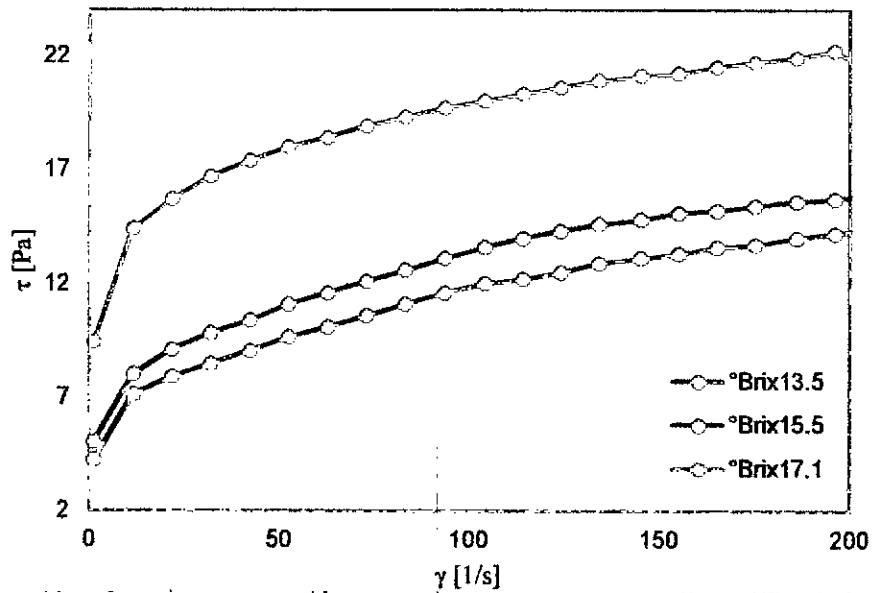
Fuente: Elaboración propia

5.3. Determinación de los datos reológicos para el zumo de mango Kent

Se obtuvieron 18 tablas de datos Esfuerzo de corte [Pa] – Velocidad de corte [1/s] de acuerdo a las condiciones planteadas en el diseño de experimentación por bloques, ver Anexo 1. Se representó el comportamiento reológicos mediante los siguientes reogramas.

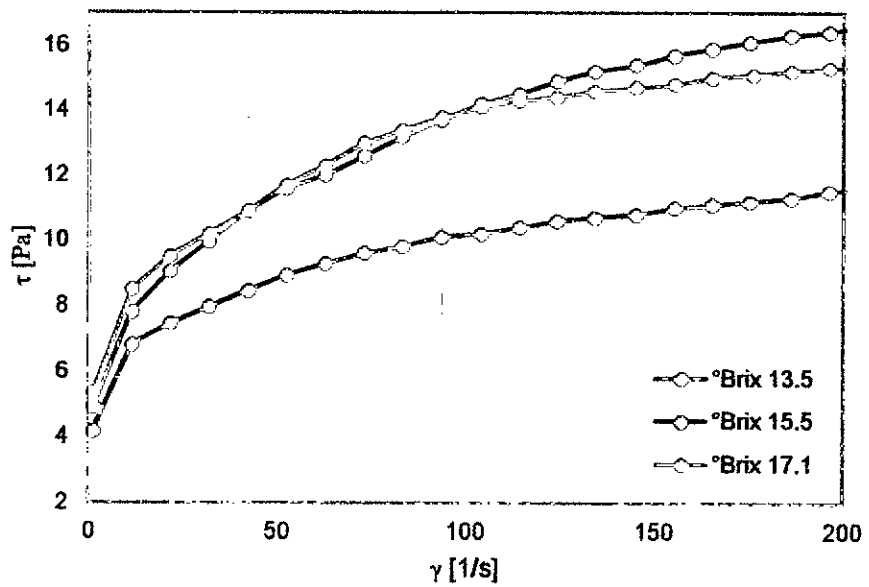
5.3.1. Reogramas a temperatura constante

Gráfica N° 5.1: Reograma a 10 °C



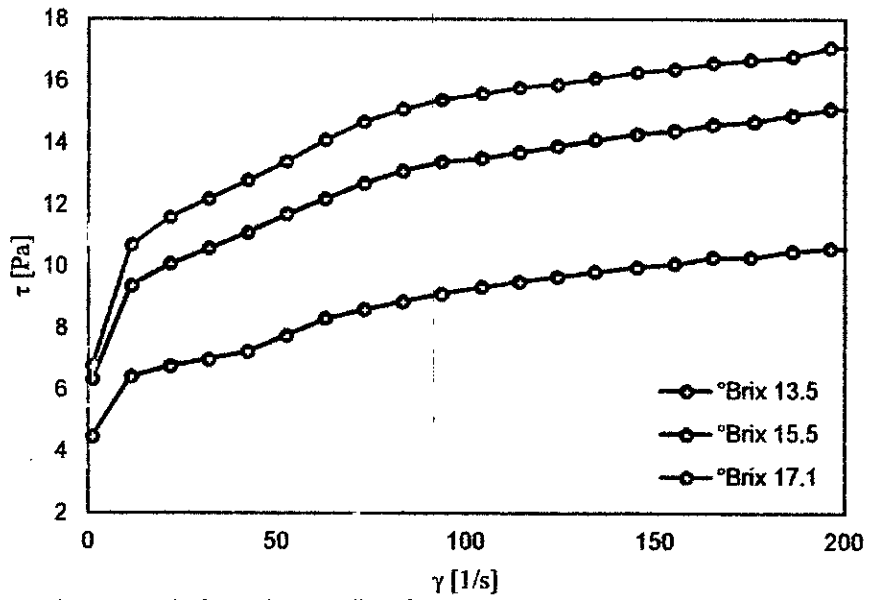
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.2: Reograma a 20 °C



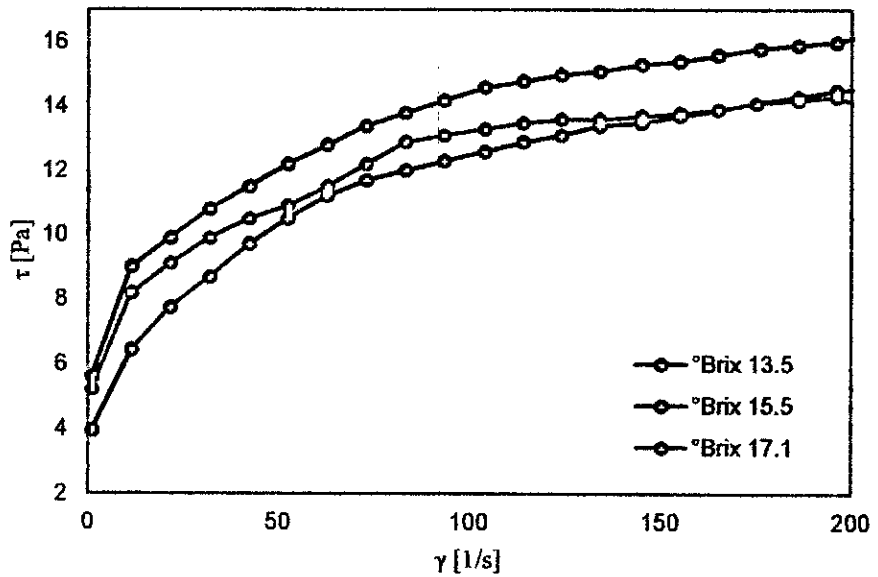
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.3: Reograma a 30°C



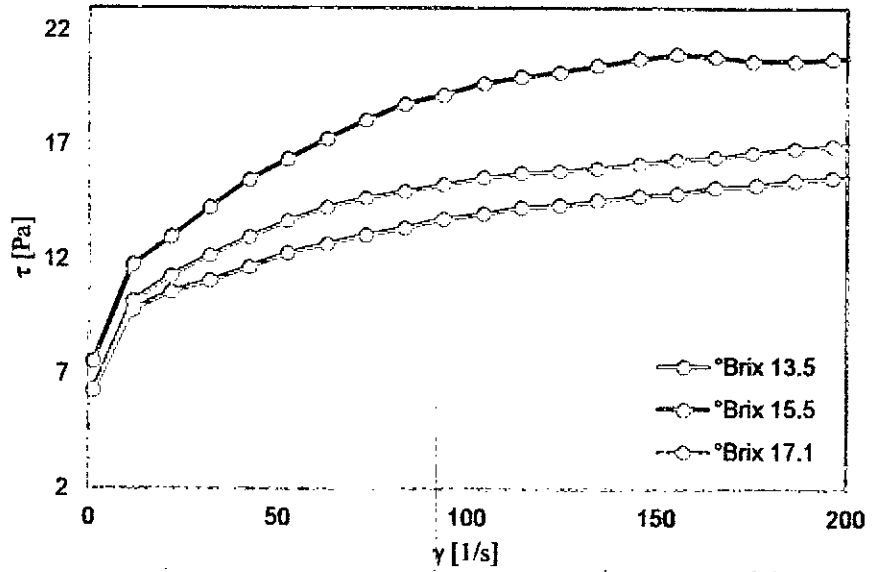
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.4: Reograma a 40°C



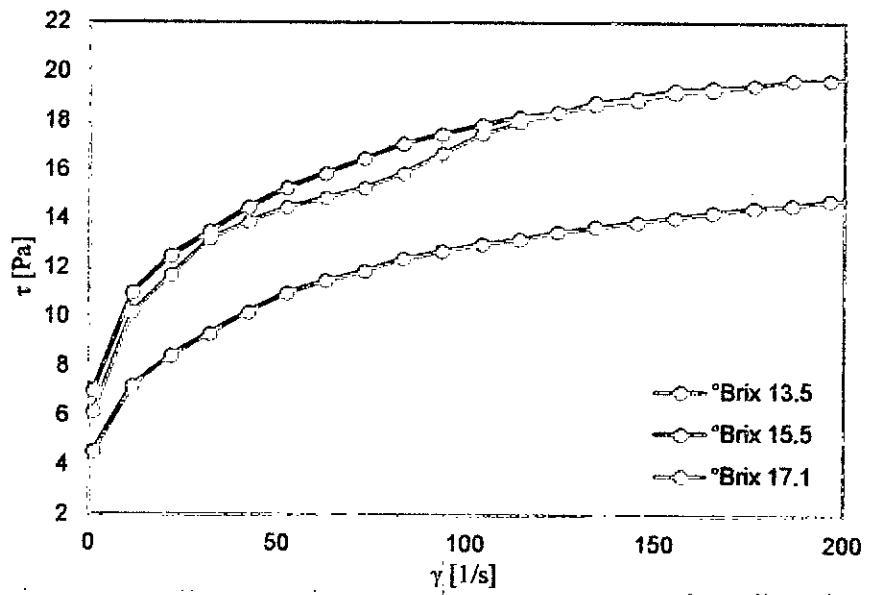
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.5: Reograma a 50°C



Fuente: Elaboración propia

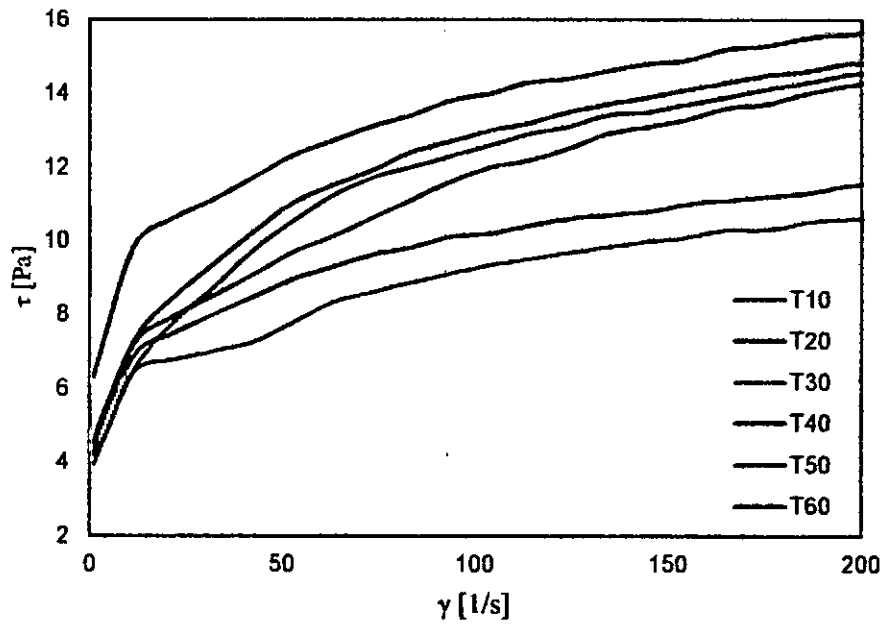
Gráfica N° 5.6: Reograma a 60°C



Fuente: Elaboración propia

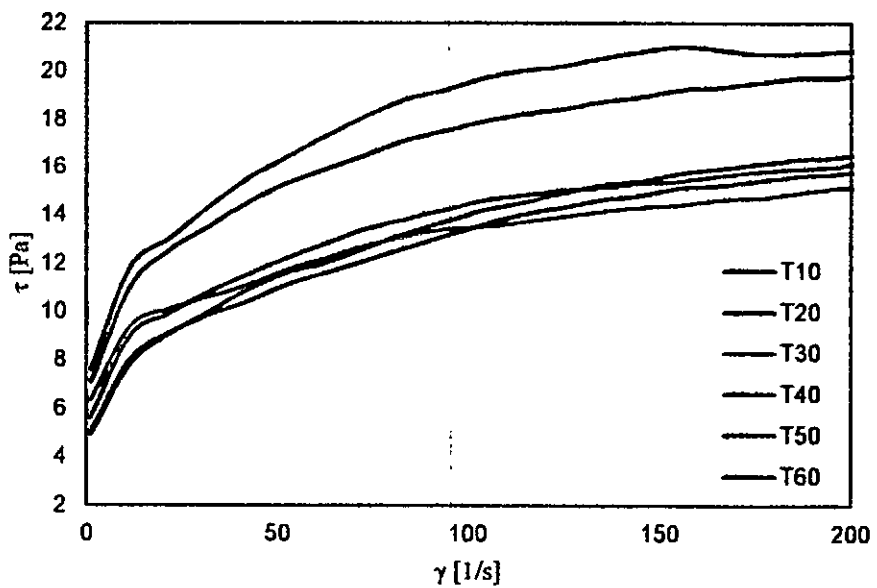
5.3.2. Reogramas a concentración constante

Gráfica N° 5.7: Reograma a 13.5°Brix



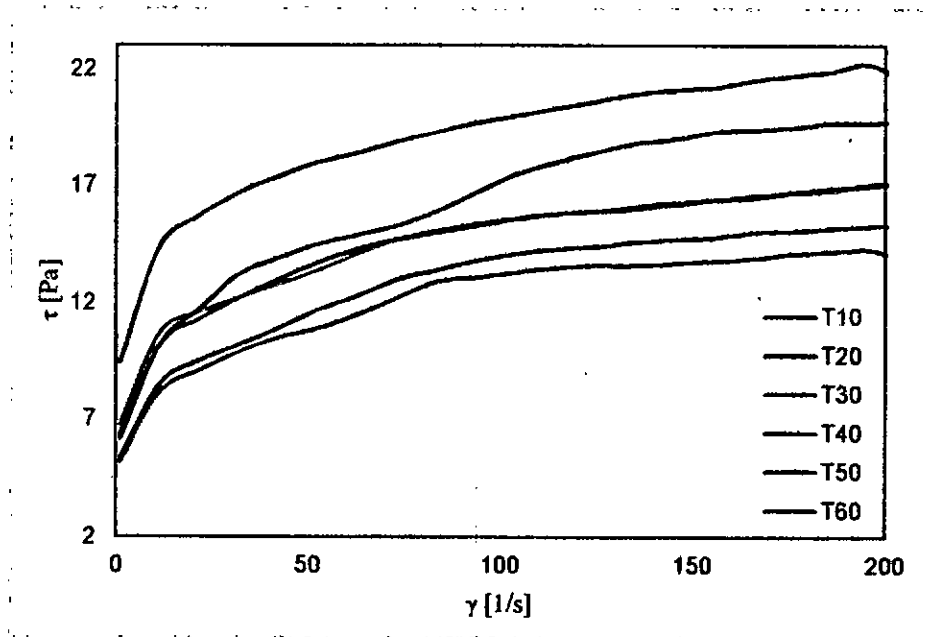
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.8: Reograma a 15.5°Brix



Fuente: Elaboración propia

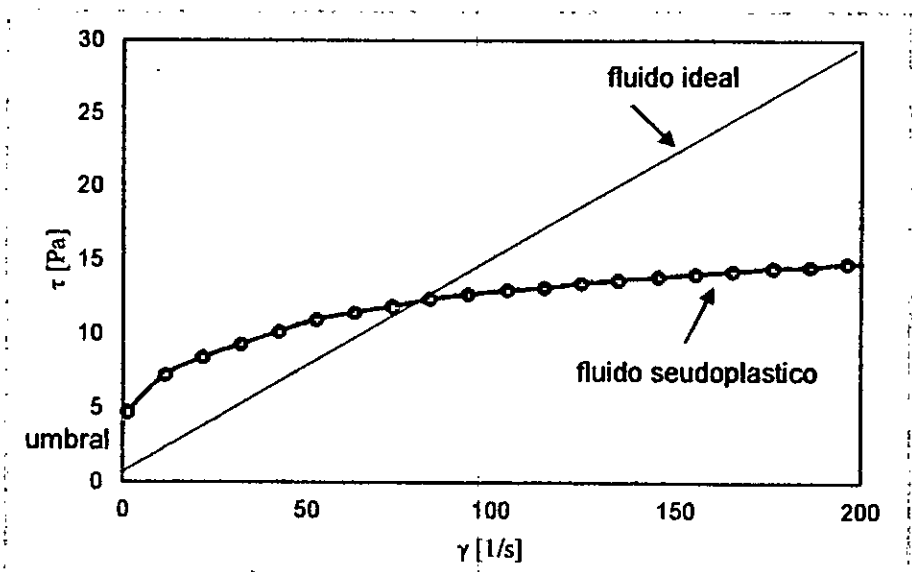
Gráfica N° 5.9: Reograma a 17.1°Brix



Fuente: Elaboración propia

Los datos de esfuerzo de corte – velocidad de corte presentan una tendencia hacia un fluido pseudoplástico:

Gráfica N° 5.10: Reograma pseudoplástico



Fuente: Elaboración propia

5.4. Determinación de la relación numérica para los datos reológicos del zumo de mango Kent.

Se realizó el ajuste de los datos reológicos del zumo de mango Kent para los modelos de Ley de Potencia, Casson, Ellis, Herschel Bulkley, Mizrahi-Berk, Robertson Stiff y Sisko en base a las ecuaciones de mínimos cuadrados descritas en el capítulo II del presente informe.

Para el modelo de Ley de potencia

El sistema de ecuaciones para la ecuación de mínimos cuadrados corresponde a:

Para la constante K

$$-\frac{1}{2} \frac{dS}{dK} = \sum [y_i - Kx_i^n][x_i^n] = 0 \quad (5.3)$$

Desarrollando la sumatoria y utilizando los datos reológicos del zumo de mango Kent (ver Anexo 1) se tiene:

$$\begin{aligned} \sum [y_i - Kx_i^n][x_i^n] = & [4.25-K(1)^n][1^n] + [7.14-K(11.3)^n][11.3^n] + [7.92- \\ & K(21.5)^n][21.5^n] + [8.49-K(31.8)^n][31.8^n] + [9.06-K(42.1)^n][42.1^n] + [9.67- \\ & K(52.3)^n][52.3^n] + [10.1-K(62.5)^n][62.5^n] + [10.6-K(72.9)^n][72.9^n] + [11.1- \\ & K(83.1)^n][83.1^n] + [10.6-K(93.4)^n][93.4^n] + [12-K(104)^n][104^n] + [12.2- \\ & K(114)^n][114^n] + [12.5-K(124)^n][124^n] + [12.9-K(134)^n][134^n] + [13.1- \\ & K(145)^n][145^n] + [13.3-K(155)^n][155^n] + [13.6-K(165)^n][165^n] + [13.7- \\ & K(175)^n][175^n] + [14-K(186)^n][186^n] + [14.2-K(196)^n][196^n] + [14.4- \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&K(206)^n[206^n]+[14.7-K(217)^n][217^n]+[14.8-K(227)^n][227^n]+[15- \\
&K(237)^n][237^n]+[15.2-K(247)^n][247^n]+[15.4-K(258)^n][258^n]+[15.6- \\
&K(268)^n][268^n]+[15.7-K(278)^n][278^n]+[15.8-K(288)^n][288^n]+[16- \\
&K(299)^n][299^n]+[16.1-K(309)^n][309^n]+[16.2-K(319)^n][319^n]+[16.4- \\
&K(329)^n][329^n]+[16.4-K(340)^n][340^n]+[16.5-K(350)^n][350^n]=0 \quad (5.4)
\end{aligned}$$

Para la constante n:

$$-\frac{1}{2} \frac{dS}{dn} = \sum [y_i - Kx_i^n][\ln x_i Kx_i^n] = 0 \quad (5.5)$$

Desarrollando la sumatoria y utilizando los datos reológicos del zumo de mango Kent (ver Anexo 1) se tiene:

$$\begin{aligned}
\sum [y_i - Kx_i^n][\ln x_i Kx_i^n] = &[4.25-K(1)^n][\ln(1) \cdot K(1^n)] + [7.14 \\
&K(11.3)^n][\ln(11.3) \cdot K(11.3^n)] + [7.92-K(21.5)^n][\ln(21.5) \cdot K(21.5^n)] + [8.49- \\
&K(31.8)^n][\ln(31.8) \cdot K(31.8^n)] + [9.06-K(42.1)^n][\ln(42.1) \cdot K(42.1^n)] + [9.67- \\
&K(52.3)^n][\ln(52.3) \cdot K(52.3^n)] + [10.1-K(62.5)^n][\ln(62.5) \cdot K(62.5^n)] + [10.6- \\
&K(72.9)^n][\ln(72.9) \cdot K(72.9^n)] + [11.1-K(83.1)^n][\ln(83.1) \cdot K(83.1^n)] + [10.6- \\
&K(93.4)^n][\ln(93.4) \cdot K(93.4^n)] + [12-K(104)^n][\ln(104) \cdot K(104^n)] + [12.2- \\
&K(114)^n][\ln(114) \cdot K(114^n)] + [12.5-K(124)^n][\ln(124) \cdot K(124^n)] + [12.9- \\
&K(134)^n][\ln(134) \cdot K(134^n)] + [13.1-K(145)^n][\ln(145) \cdot K(145^n)] + [13.3- \\
&K(155)^n][\ln(155) \cdot K(155^n)] + [13.6-K(165)^n][\ln(165) \cdot K(165^n)] + [13.7- \\
&K(175)^n][\ln(175) \cdot K(175^n)] + [14-K(186)^n][\ln(186) \cdot K(186^n)] + [14.2- \\
&K(196)^n][\ln(196) \cdot K(196^n)] + [14.4-K(206)^n][\ln(206) \cdot K(206^n)] + [14.7- \\
&K(217)^n][\ln(217) \cdot K(217^n)] + [14.8-K(227)^n][\ln(227) \cdot K(227^n)] + [15-
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&K(237)^n[\ln(237) \cdot K(237)^n] + [15.2 - K(247)^n][\ln(247) \cdot K(247)^n] + [15.4 - \\
&K(258)^n][\ln(258) \cdot K(258)^n] + [15.6 - K(268)^n][\ln(268) \cdot K(268)^n] + [15.7 - \\
&K(278)^n][\ln(278) \cdot K(278)^n] + [15.8 - K(288)^n][\ln(288) \cdot K(288)^n] + [16 - \\
&K(299)^n][\ln(299) \cdot K(299)^n] + [16.1 - K(309)^n][\ln(309) \cdot K(309)^n] + [16.2 - \\
&K(319)^n][\ln(319) \cdot K(319)^n] + [16.4 - K(329)^n][\ln(329) \cdot K(329)^n] + [16.4 - \\
&K(340)^n][\ln(340) \cdot K(340)^n] + [16.5 - K(350)^n][\ln(350) \cdot K(350)^n] = 0 \quad (5.6)
\end{aligned}$$

Las ecuaciones (5.4) y (5.6) describen el sistema de ecuaciones no lineales para las variables K y n . El cálculo numérico se realizó con ayuda del software Minitab 16 y se obtuvo:

$$n = 0.2681$$

$$K = 3.4487$$

En base a los parámetros calculados el modelo resulta:

$$\hat{y}_i = 3.4487x_i^{0.2681} \quad (5.7)$$

El índice de correlación se calcula mediante:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5.8)$$

Los valores proyectados \hat{y}_i [τ (Pa)] se obtienen para cada x_i [γ (1/s)] reemplazando en la ecuación (5.7).

Desarrollando las expresiones de sumatoria del segundo miembro de la ecuación (5.8)

$$\begin{aligned} \sum (y_i - \hat{y})^2 = & (4.25 - 3.45)^2 + (7.14 - 6.61)^2 + (7.92 - 7.85)^2 + (8.49 - \\ & 8.72)^2 + (9.06 - 9.40)^2 + (9.67 - 9.96)^2 + (10.10 - 10.46)^2 + (10.60 - \\ & 10.89)^2 + (11.10 - 11.28)^2 + (11.60 - 11.64)^2 + (12.00 - 11.98)^2 + (12.20 - \\ & 12.28)^2 + (12.50 - 12.56)^2 + (12.90 - 12.82)^2 + (13.10 - 13.10)^2 + (13.30 - \\ & 13.34)^2 + (13.60 - 13.56)^2 + (13.70 - 13.78)^2 + (14.00 - 14.00)^2 + (14.20 - \\ & 14.20)^2 + (14.40 - 14.39)^2 + (14.70 - 14.59)^2 + (14.80 - 14.77)^2 + (15.00 - \\ & 14.94)^2 + (15.20 - 15.11)^2 + (15.40 - 15.29)^2 + (15.60 - 15.44)^2 + (15.70 - \\ & 15.60)^2 + (15.80 - 15.75)^2 + (16.00 - 15.90)^2 + (16.10 - 16.05)^2 + (16.20 - \\ & 16.18)^2 + (16.40 - 16.32)^2 + (16.40 - 16.46)^2 + (16.50 - 16.59)^2 = 1.57 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum (y_i - \bar{y})^2 = & (4.25 - 13.2)^2 + (7.14 - 13.2)^2 + (7.92 - 13.2)^2 + (8.49 - \\ & 13.2)^2 + (9.06 - 13.2)^2 + (9.67 - 13.2)^2 + (10.10 - 13.2)^2 + (10.60 - \\ & 13.2)^2 + (11.10 - 13.2)^2 + (11.60 - 13.2)^2 + (12.00 - 13.2)^2 + (12.20 - \\ & 13.2)^2 + (12.50 - 13.2)^2 + (12.90 - 13.2)^2 + (13.10 - 13.2)^2 + (13.30 - \\ & 13.2)^2 + (13.60 - 13.2)^2 + (13.70 - 13.2)^2 + (14.00 - 13.2)^2 + (14.20 - \\ & 13.2)^2 + (14.40 - 13.2)^2 + (14.70 - 13.2)^2 + (14.80 - 13.2)^2 + (15.00 - \\ & 13.2)^2 + (15.20 - 13.2)^2 + (15.40 - 13.2)^2 + (15.60 - 13.2)^2 + (15.70 - \\ & 13.2)^2 + (15.80 - 13.2)^2 + (16.00 - 13.2)^2 + (16.10 - 13.2)^2 + (16.20 - \\ & 13.2)^2 + (16.40 - 13.2)^2 + (16.40 - 13.2)^2 + (16.50 - 13.2)^2 = 317.48 \end{aligned}$$

Y luego reemplazando en (5.8) resulta:

$$R^2 = 1 - \frac{1.57}{317.48}$$

$$R^2 = 0.99507$$

La varianza asociada a la regresión (MSE) se calcula mediante:

$$MSE = S^2 \quad (5.9)$$

$$S = \sqrt{\frac{SSE}{N - P}} \quad (5.10)$$

Calculando la suma de cuadrados residuales:

$$SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = 1.57$$

Reemplazando en la ecuación (5.10):

$$S = \sqrt{\frac{1.57}{35 - 2}}$$

$$S = 0.217814$$

El valor de MSE resulta:

$$MSE = 0.0474428$$

Para fines de cálculo se utilizó el software Minitab 16 en combinación con el Excel, con los cuales se obtuvieron los siguientes resultados para cada modelo:

Tabla N°5.3: Parámetros para el modelo de Ley de Potencia

LEY DE POTENCIA					
	<i>K</i>	<i>n</i>	R ²	MSE	S
Txy1: 10°C y 13.5°Brix	3.44873	0.26815	0.99507	0.04744	0.21781
Txy2: 10°C y 15.5°Brix	4.38786	0.24157	0.99404	0.05634	0.23736
Txy3: 10°C y 17.1°Brix	9.6769	0.15657	0.99910	0.00914	0.09563
Txy4: 20°C y 13.5°Brix	4.22318	0.18955	0.99924	0.00399	0.06313
Txy5: 20°C y 15.5°Brix	4.41081	0.24815	0.99501	0.05826	0.24137
Txy6: 20°C y 17.1°Brix	5.44552	0.19636	0.98815	0.08684	0.29469
Txy7: 30°C y 13.5°Brix	3.7419	0.19662	0.98479	0.04999	0.22359
Txy8: 30°C y 15.5°Brix	5.99598	0.17399	0.99581	0.02337	0.15286
Txy9: 30°C y 17.1°Brix	7.04758	0.1667	0.99384	0.04258	0.20636
Txy10: 40°C y 13.5°Brix	3.83724	0.25126	0.99101	0.07949	0.28193
Txy11: 40°C y 15.5°Brix	5.49065	0.20454	0.99391	0.04906	0.22149
Txy12: 40°C y 17.1°Brix	5.08054	0.20027	0.98508	0.09314	0.30518
Txy13: 50°C y 13.5°Brix	6.19743	0.17504	0.99790	0.01262	0.11233
Txy14: 50°C y 15.5°Brix	6.82934	0.22465	0.99166	0.13090	0.36180
Txy15: 50°C y 17.1°Brix	6.85653	0.17204	0.99290	0.05218	0.22844
Txy16: 60°C y 13.5°Brix	4.31571	0.23357	0.99430	0.04590	0.21424
Txy17: 60°C y 15.5°Brix	6.99542	0.19787	0.99431	0.06659	0.25805
Txy18: 60°C y 17.1°Brix	6.36902	0.21208	0.98126	0.25078	0.50077

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°5.4: Parámetros para el modelo de Robertson Stiff

ROBERTSON Y STIFF						
	K_R	γ_0	n_R	R^2	MSE	S
Txy1: 10°C y 13.5°Brix	3.19777	2.00428	0.28174	0.99797	0.02018	0.14207
Txy2: 10°C y 15.5°Brix	4.12763	1.22629	0.25322	0.99641	0.03532	0.18792
Txy3: 10°C y 17.1°Brix	9.84873	-0.23062	0.1529	0.99951	0.00531	0.07290
Txy4: 20°C y 13.5°Brix	4.23699	-0.06376	0.18894	0.99898	0.00405	0.06365
Txy5: 20°C y 15.5°Brix	4.30619	0.54758	0.25252	0.99554	0.05377	0.23188
Txy6: 20°C y 17.1°Brix	6.0406	-5.65502	0.17781	0.98612	0.07026	0.26507
Txy7: 30°C y 13.5°Brix	3.33449	3.21238	0.21806	0.99356	0.02192	0.14806
Txy8: 30°C y 15.5°Brix	5.80786	0.65651	0.18011	0.99700	0.01737	0.13178
Txy9: 30°C y 17.1°Brix	7.38984	-2.32566	0.15801	0.99113	0.03953	0.19882
Txy10: 40°C y 13.5°Brix	3.84261	-0.02364	0.25099	0.99101	0.08265	0.28749
Txy11: 40°C y 15.5°Brix	5.45116	0.11458	0.20596	0.99397	0.05084	0.22549
Txy12: 40°C y 17.1°Brix	5.01482	0.17959	0.20295	0.98523	0.09762	0.31245
Txy13: 50°C y 13.5°Brix	6.12254	0.20866	0.17743	0.99807	0.01209	0.10997
Txy14: 50°C y 15.5°Brix	6.25814	1.1885	0.2432	0.99553	0.07568	0.27511
Txy15: 50°C y 17.1°Brix	7.08182	-0.49386	0.16585	0.99474	0.03998	0.19994
Txy16: 60°C y 13.5°Brix	4.2554	0.22815	0.23631	0.99448	0.04654	0.21573
Txy17: 60°C y 15.5°Brix	6.99938	-0.00876	0.19775	0.99431	0.06961	0.26384
Txy18: 60°C y 17.1°Brix	6.46064	-0.24789	0.20939	0.98153	0.25572	0.50569

Fuente: Elaboración propia

Tabla N°5.5: Parámetros para el modelo de Casson

CASSON					
	K_{OC}	K_C	R^2	MSE	S
Txy1: 10°C y 13.5°Brix	2.44267	0.09191	0.9693	0.29577	0.54385
Txy2: 10°C y 15.5°Brix	2.58717	0.09884	0.9558	0.417545	0.64618
Txy3: 10°C y 17.1°Brix	3.46143	0.09508	0.9147	0.868811	0.93210
Txy4: 20°C y 13.5°Brix	2.49215	0.06199	0.9283	0.277044	0.52635
Txy5: 20°C y 15.5°Brix	2.71134	0.09214	0.9404	0.696793	0.83474
Txy6: 20°C y 17.1°Brix	2.82998	0.07610	0.8976	0.750378	0.86624
Txy7: 30°C y 13.5°Brix	2.32515	0.06525	0.9620	0.124942	0.35347
Txy8: 30°C y 15.5°Brix	2.86370	0.07213	0.9376	0.347812	0.58976
Txy9: 30°C y 17.1°Brix	3.11282	0.07097	0.8980	0.705218	0.83977
Txy10: 40°C y 13.5°Brix	2.45916	0.09571	0.9217	0.692493	0.83216
Txy11: 40°C y 15.5°Brix	2.77769	0.09052	0.9221	0.627543	0.79218
Txy12: 40°C y 17.1°Brix	2.59382	0.09346	0.9124	0.546855	0.73950
Txy13: 50°C y 13.5°Brix	2.88175	0.07768	0.9346	0.392885	0.62681
Txy14: 50°C y 15.5°Brix	2.96170	0.14031	0.9566	0.68195	0.82580
Txy15: 50°C y 17.1°Brix	3.08996	0.07261	0.8855	0.840556	0.91682
Txy16: 60°C y 13.5°Brix	2.52555	0.09611	0.9298	0.565764	0.75217
Txy17: 60°C y 15.5°Brix	3.11948	0.09755	0.9140	1.00649	1.00324
Txy18: 60°C y 17.1°Brix	3.11155	0.09125	0.8919	1.44727	1.20302

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 5.6: Parámetros para el modelo de Herschel Bulkley

HERSCHEL BULKLEY						
	τ_{0H}	K_H	n_H	R^2	MSE	S
Txy1: 10°C y 13.5°Brix	2.26370	1.99005	0.33876	0.99806	0.01923	0.13866
Txy2: 10°C y 15.5°Brix	2.06259	2.87138	0.2956	0.99594	0.03996	0.19990
Txy3: 10°C y 17.1°Brix	-2.24470	11.7606	0.1376	0.99935	0.00700	0.08369
Txy4: 20°C y 13.5°Brix	-0.23663	4.42118	0.18475	0.99899	0.00404	0.06356
Txy5: 20°C y 15.5°Brix	0.38103	4.1347	0.25587	0.99506	0.05957	0.24406
Txy6: 20°C y 17.1°Brix	-2.97286	7.99537	0.15717	0.98941	0.08024	0.28326
Txy7: 30°C y 13.5°Brix	2.98712	1.46933	0.31072	0.99336	0.02260	0.15033
Txy8: 30°C y 15.5°Brix	2.12143	4.19708	0.2129	0.99692	0.01785	0.13360
Txy9: 30°C y 17.1°Brix	-3.70940	10.3885	0.1306	0.99491	0.03643	0.19086
Txy10: 40°C y 13.5°Brix	-1.37472	4.89992	0.22205	0.99164	0.07685	0.27722
Txy11: 40°C y 15.5°Brix	-0.32396	5.76361	0.19905	0.99394	0.05110	0.22606
Txy12: 40°C y 17.1°Brix	-0.11532	5.18048	0.19801	0.98509	0.09859	0.31399
Txy13: 50°C y 13.5°Brix	1.28980	5.08028	0.19657	0.99823	0.01111	0.10539
Txy14: 50°C y 15.5°Brix	3.50369	3.96859	0.29877	0.99489	0.08638	0.29391
Txy15: 50°C y 17.1°Brix	-7.72910	13.9094	0.1090	0.99625	0.02843	0.16863
Txy16: 60°C y 13.5°Brix	-0.23049	4.49938	0.22855	0.99432	0.04783	0.21871
Txy17: 60°C y 15.5°Brix	-1.49679	8.28374	0.17941	0.99457	0.06645	0.25778
Txy18: 60°C y 17.1°Brix	-3.99579	9.71387	0.16746	0.98289	0.23693	0.48676

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 5.7: Parámetros para el modelo de Mizrahi-Berk

MIZRAHI Y BERK						
	τ_{0M}	K_M	n_M	R^2	MSE	S
Txy1: 10°C y 13.5°Brix	1.21267	0.83873	0.21061	0.99796	0.02027	0.14238
Txy2: 10°C y 15.5°Brix	1.0754	1.13745	0.17669	0.99577	0.04161	0.20399
Txy3: 10°C y 17.1°Brix	-1.29137	4.37745	0.05938	0.99933	0.00721	0.08492
Txy4: 20°C y 13.5°Brix	-0.18225	2.22775	0.08942	0.99899	0.00403	0.06352
Txy5: 20°C y 15.5°Brix	0.08515	2.02347	0.12708	0.99502	0.06002	0.24499
Txy6: 20°C y 17.1°Brix	-3.26097	5.49305	0.05074	0.98970	0.07801	0.27930
Txy7: 30°C y 13.5°Brix	1.5695	0.53557	0.21658	0.99314	0.02336	0.15285
Txy8: 30°C y 15.5°Brix	1.08313	1.42824	0.12713	0.99687	0.01809	0.13450
Txy9: 30°C y 17.1°Brix	-3.38753	5.97024	0.04344	0.99500	0.03582	0.18926
Txy10: 40°C y 13.5°Brix	-1.5614	3.42141	0.08512	0.99196	0.07393	0.27190
Txy11: 40°C y 15.5°Brix	-0.33362	2.66039	0.09328	0.99397	0.05085	0.22551
Txy12: 40°C y 17.1°Brix	-0.20801	2.45335	0.09405	0.98511	0.09846	0.31379
Txy13: 50°C y 13.5°Brix	0.7234	1.80074	0.11069	0.99825	0.01100	0.10489
Txy14: 50°C y 15.5°Brix	1.52048	1.20798	0.18733	0.99470	0.08961	0.29935
Txy15: 50°C y 17.1°Brix	-16.1565	18.6396	0.016	0.99642	0.02665	0.16324
Txy16: 60°C y 13.5°Brix	-0.32607	2.38205	0.10622	0.99437	0.04742	0.21776
Txy17: 60°C y 15.5°Brix	-1.18674	3.78532	0.07563	0.99467	0.06521	0.25536
Txy18: 60°C y 17.1°Brix	-4.28406	6.66069	0.05065	0.98332	0.23098	0.48060

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 5.8: Parámetros para el modelo de Sisko

SISKO						
	n_α	K_S	n_S	R^2	MSE	S
Txy1: 10°C y 13.5°Brix	0.00516	3.88791	0.2303	0.99680	0.03176	0.17820
Txy2: 10°C y 15.5°Brix	0.00331	4.60923	0.2243	0.99456	0.05359	0.23150
Txy3: 10°C y 17.1°Brix	-0.00111	9.6156	0.1593	0.99916	0.00905	0.09515
Txy4: 20°C y 13.5°Brix	-0.00036	4.18446	0.1926	0.99900	0.00397	0.06301
Txy5: 20°C y 15.5°Brix	-0.0038	4.11043	0.2706	0.99571	0.05168	0.22734
Txy6: 20°C y 17.1°Brix	-0.00702	4.84682	0.2355	0.99284	0.05421	0.23283
Txy7: 30°C y 13.5°Brix	0.00453	4.19935	0.1575	0.99027	0.03311	0.18196
Txy8: 30°C y 15.5°Brix	0.00184	6.16584	0.1641	0.99632	0.02129	0.14591
Txy9: 30°C y 17.1°Brix	-0.00396	6.66748	0.1860	0.99592	0.02925	0.17101
Txy10: 40°C y 13.5°Brix	-0.01016	3.28125	0.3056	0.99484	0.04744	0.21780
Txy11: 40°C y 15.5°Brix	-0.00396	5.23729	0.2220	0.99481	0.04374	0.20914
Txy12: 40°C y 17.1°Brix	-0.00519	4.83176	0.2209	0.98642	0.08974	0.29956
Txy13: 50°C y 13.5°Brix	0.0018	6.33918	0.1666	0.99828	0.01079	0.10387
Txy14: 50°C y 15.5°Brix	0.01024	7.19426	0.2010	0.99307	0.11723	0.34240
Txy15: 50°C y 17.1°Brix	-0.00673	6.24497	0.2044	0.99809	0.01452	0.12048
Txy16: 60°C y 13.5°Brix	-0.00549	4.00916	0.2604	0.99559	0.03704	0.19245
Txy17: 60°C y 15.5°Brix	-0.00712	6.53745	0.2230	0.99634	0.04475	0.21154
Txy18: 60°C y 17.1°Brix	-0.01384	5.31874	0.2720	0.98968	0.15038	0.38779

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 5.9: Parámetros para el modelo de Ellis

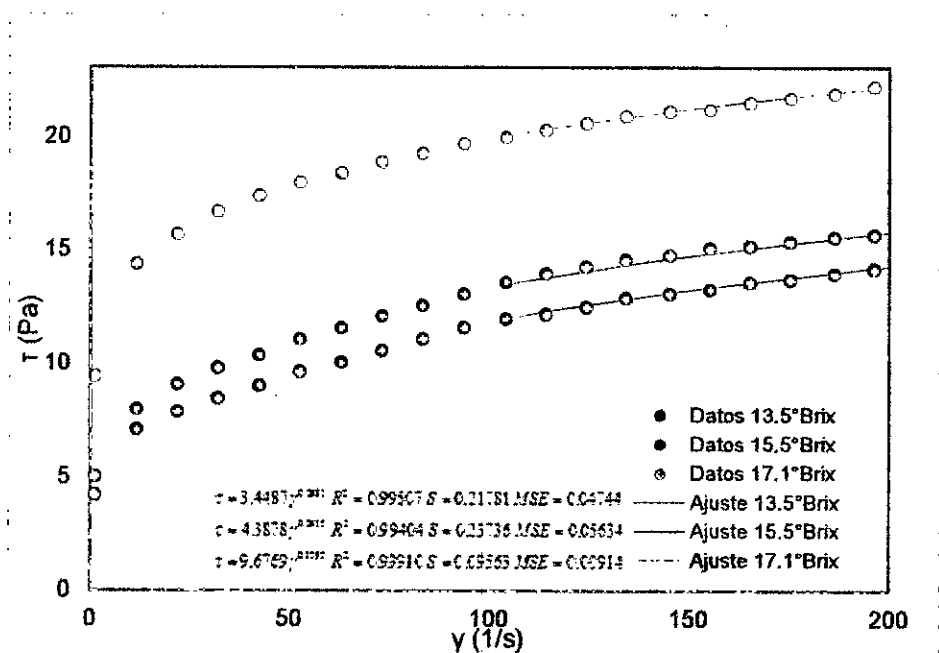
ELLIS						
	n_0	K_E	n_E	R^2	MSE	S
Txy1: 10°C y 13.5°Brix	1.40034	0.00739	0.26201	0.97431	16.7334	4.09065
Txy2: 10°C y 15.5°Brix	0.62965	0.00018	0.20053	0.93320	25.3045	5.03035
Txy3: 10°C y 17.1°Brix	-6.41684	1.00E-06	0.16204	0.99719	4.10196	2.02533
Txy4: 20°C y 13.5°Brix	4.09601	0.00035	0.18482	0.99668	12.0222	3.46731
Txy5: 20°C y 15.5°Brix	0.44713	0.00004	0.18501	0.95686	35.2527	5.93740
Txy6: 20°C y 17.1°Brix	0.59937	7.50E-07	0.14216	0.92527	44.1452	6.64419
Txy7: 30°C y 13.5°Brix	1.24040	0.00118	0.19709	0.97685	26.5251	5.15026
Txy8: 30°C y 15.5°Brix	2.73778	0.00002	0.16959	0.93828	13.7603	3.70949
Txy9: 30°C y 17.1°Brix	1.10899	1.80E-07	0.13680	0.93860	32.9668	5.74168
Txy10: 40°C y 13.5°Brix	0.51591	0.00008	0.18262	0.95622	8.89441	2.98235
Txy11: 40°C y 15.5°Brix	0.66589	2.00E-06	0.15213	0.91129	25.3731	5.03717
Txy12: 40°C y 17.1°Brix	0.35684	2.40E-10	0.09781	0.84529	77.0701	8.77896
Txy13: 50°C y 13.5°Brix	-6.63262	0.00006	0.18272	0.99589	9.45332	3.07463
Txy14: 50°C y 15.5°Brix	20.68252	0.00021	0.22632	0.99452	23.2622	4.82309
Txy15: 50°C y 17.1°Brix	1.08787	1.60E-07	0.13598	0.94658	23.186	4.81519
Txy16: 60°C y 13.5°Brix	0.56155	0.00003	0.17184	0.93143	10.4737	3.23630
Txy17: 60°C y 15.5°Brix	0.65218	2.30E-08	0.13164	0.93842	21.4924	4.63599
Txy18: 60°C y 17.1°Brix	0.32206	5.30E-12	0.09668	0.91831	291.03	17.05960

Fuente: Elaboración propia

5.5. Modelos matemáticos ajustados a los datos reológicos del zumo de mango

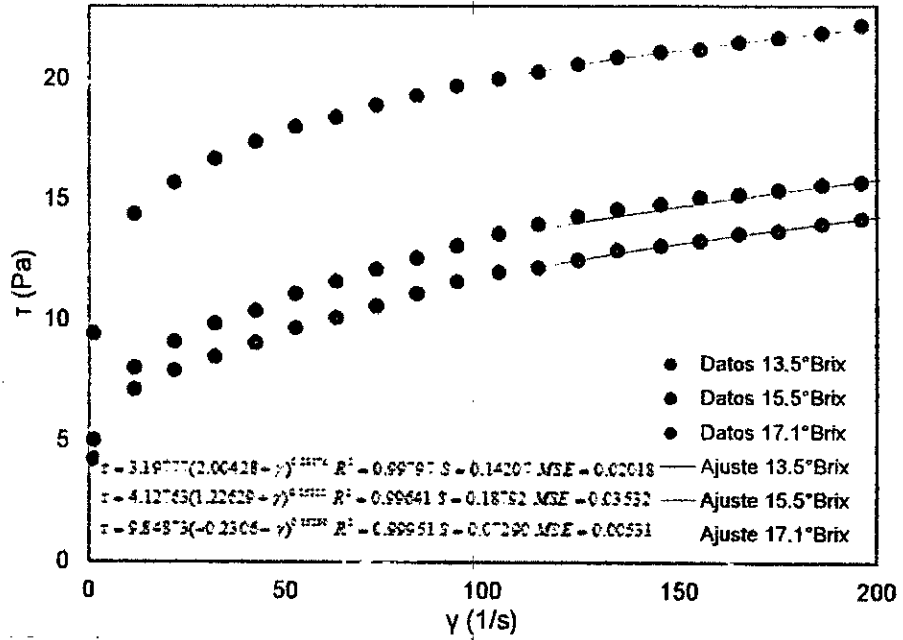
Los reogramas fueron ajustados para cada modelo, presentado en cada caso el valor de la ecuación de ajuste, el índice de correlación (R^2), la desviación estándar (S) y la varianza (MSE)

Grafica N° 5.11: Ajuste del modelo Ley de Potencia



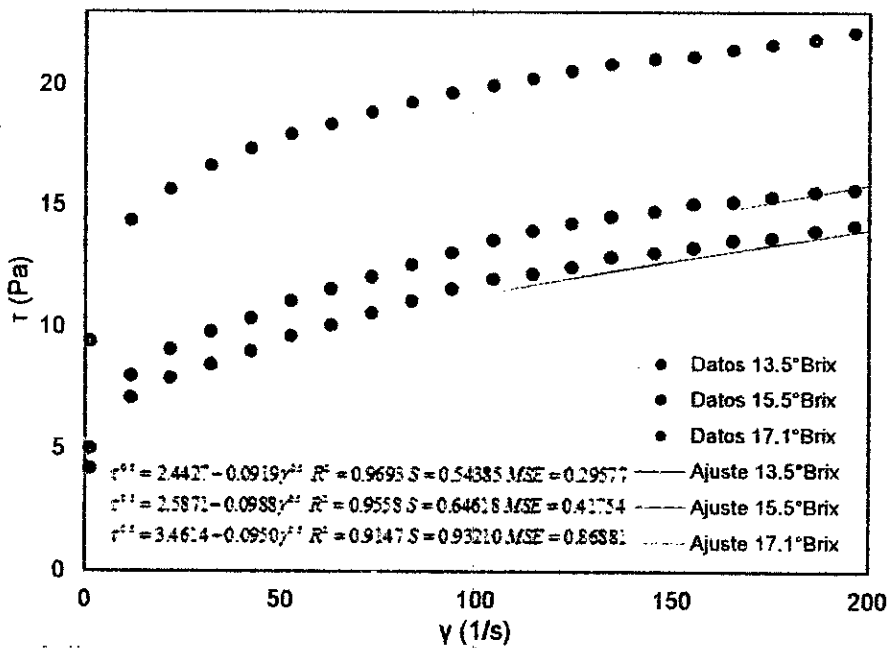
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.12: Ajuste del modelo Robertson Stiff



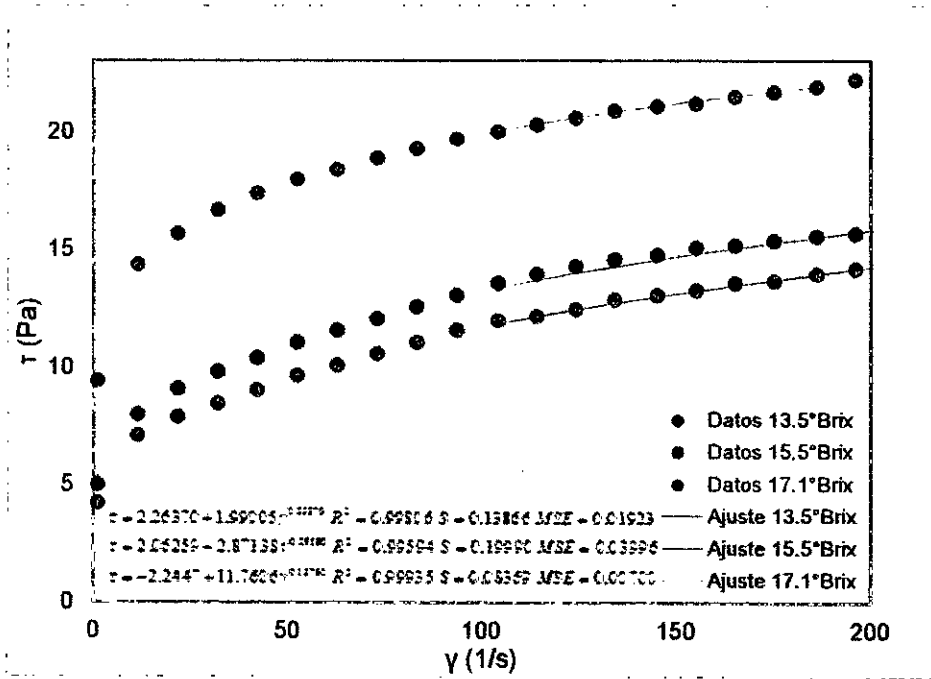
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.13: Ajuste del modelo Casson



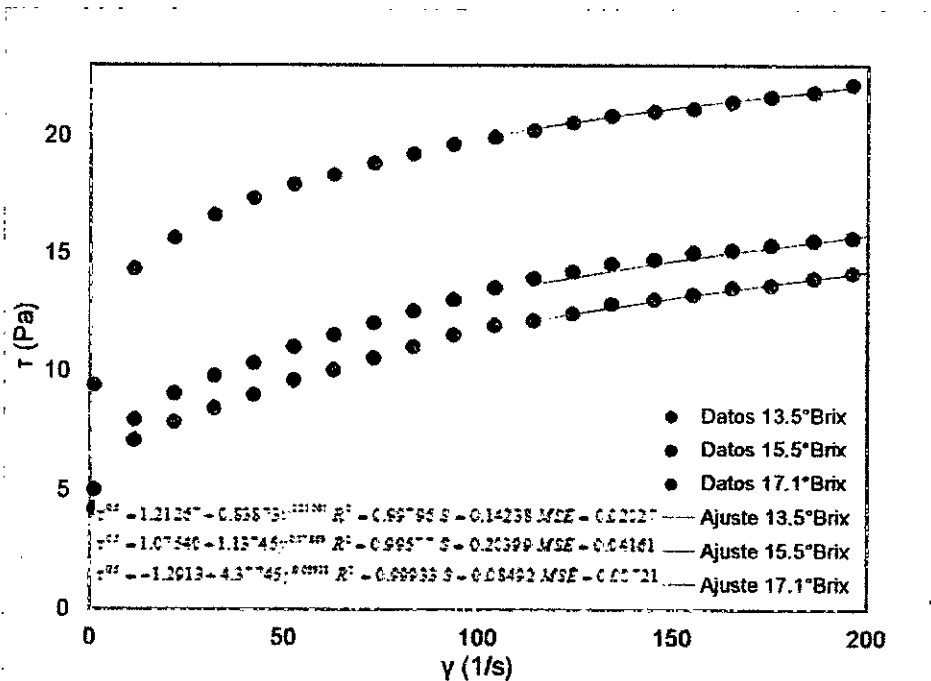
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.14: Ajuste del modelo Herschel Bulkley



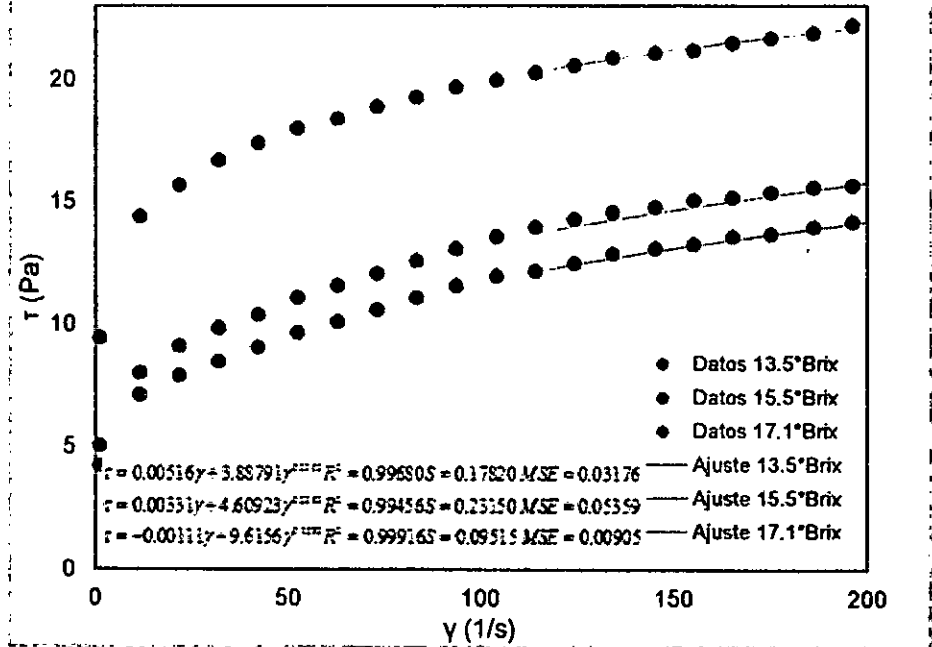
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.15: Ajuste del modelo Mizrahi-Berk



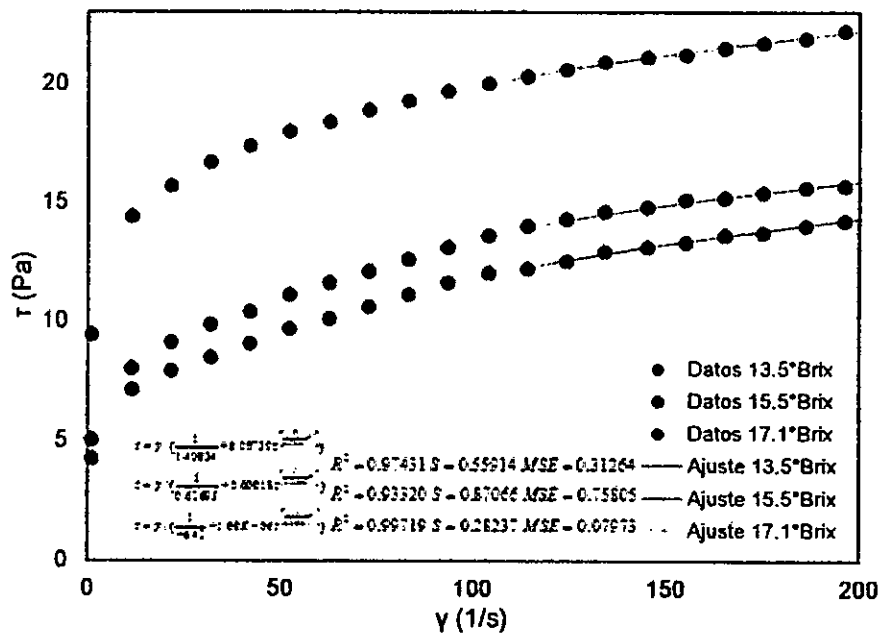
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.16: Ajuste del modelo Sisko



Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.17: Ajuste del modelo Ellis

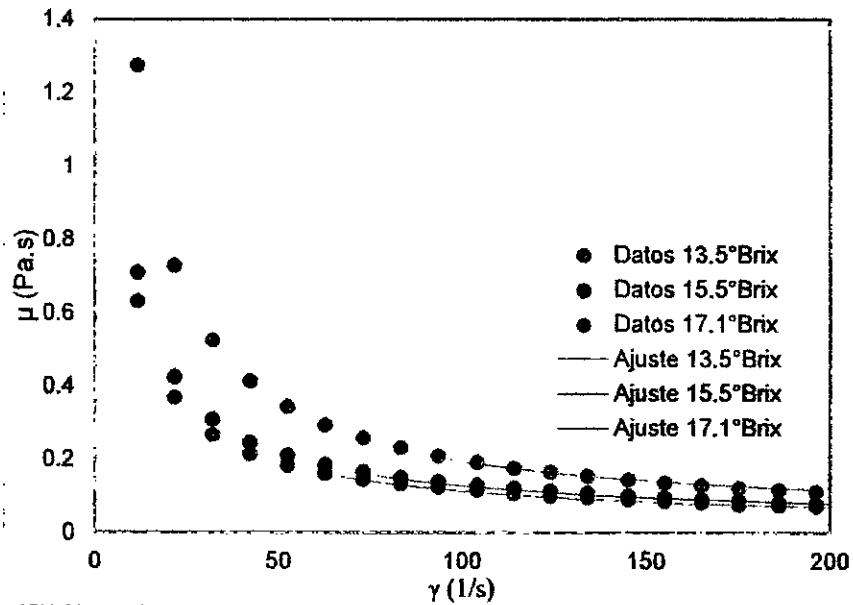


Fuente: Elaboración propia

5.6. Gráficos de viscosidad

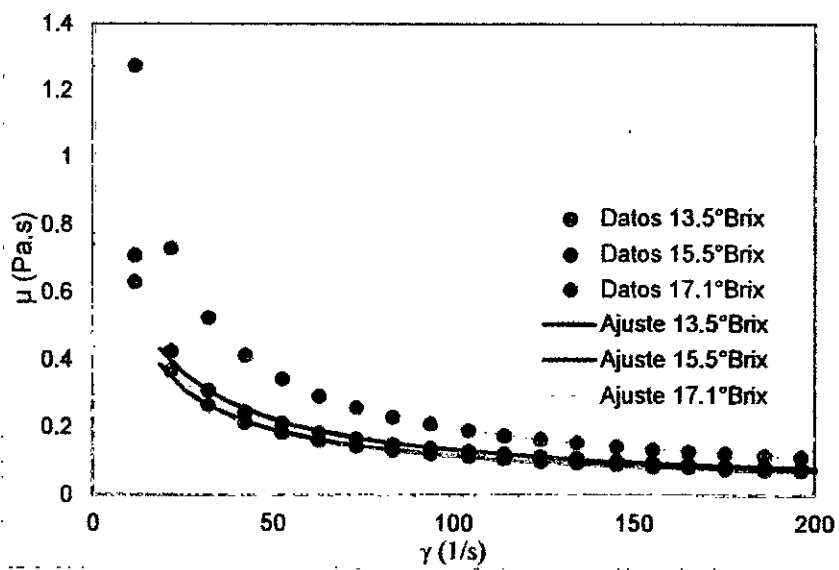
5.6.1. Viscosidad ajustada por los modelos reológicos

Gráfica N° 5.18: Viscosidad del modelo Casson



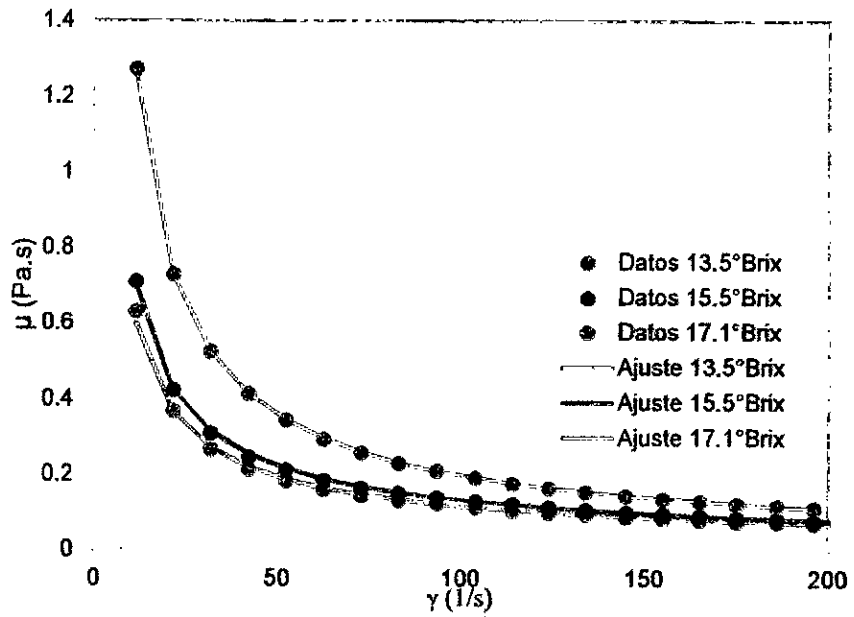
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.19: Viscosidad del modelo Ellis



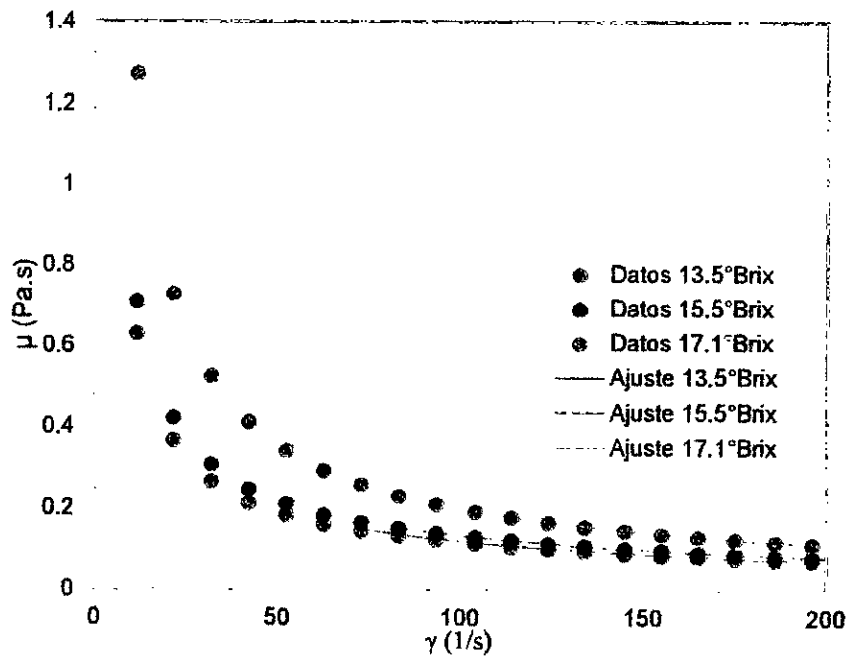
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.20: Viscosidad del modelo Herschel Bulkley



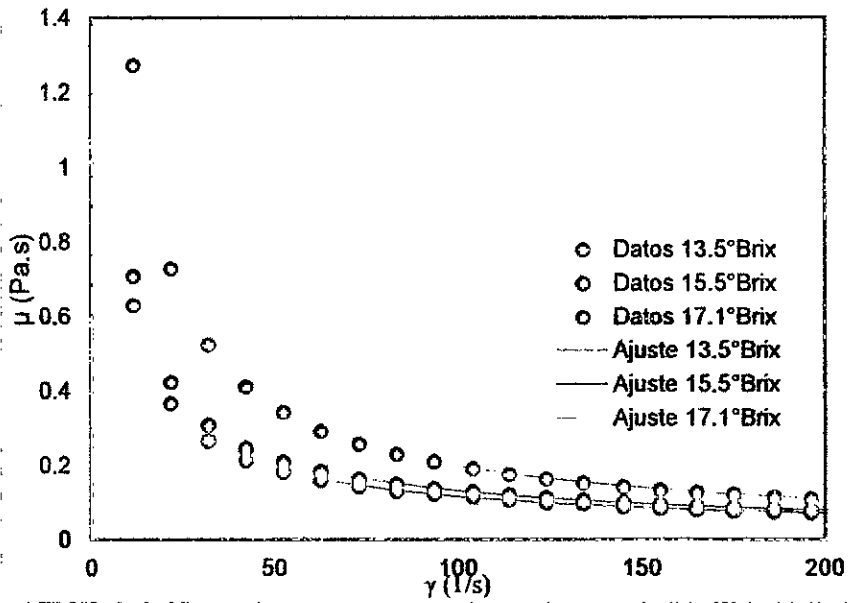
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.21: Viscosidad del modelo Ley de Potencia



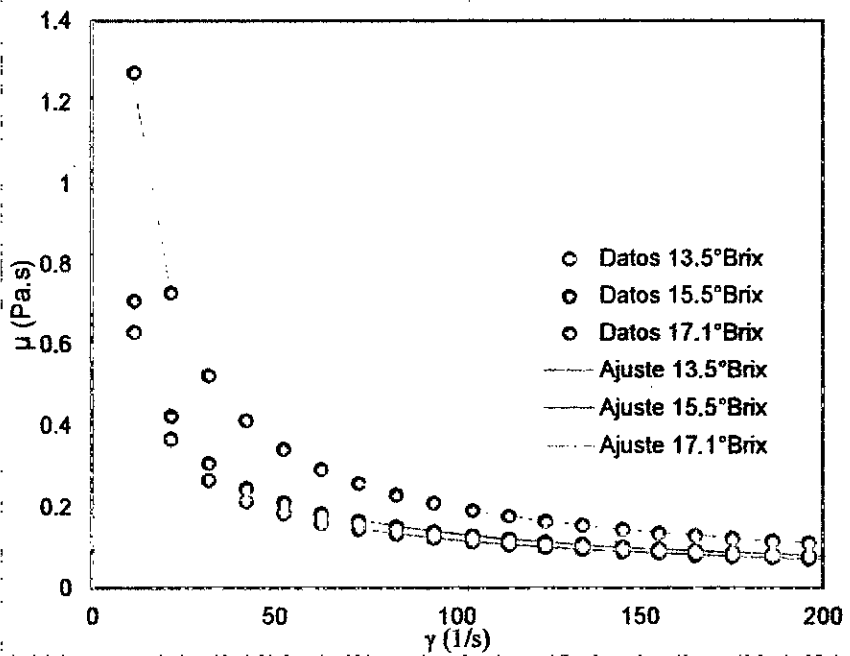
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.22: Viscosidad del modelo Mizrahi-Berk



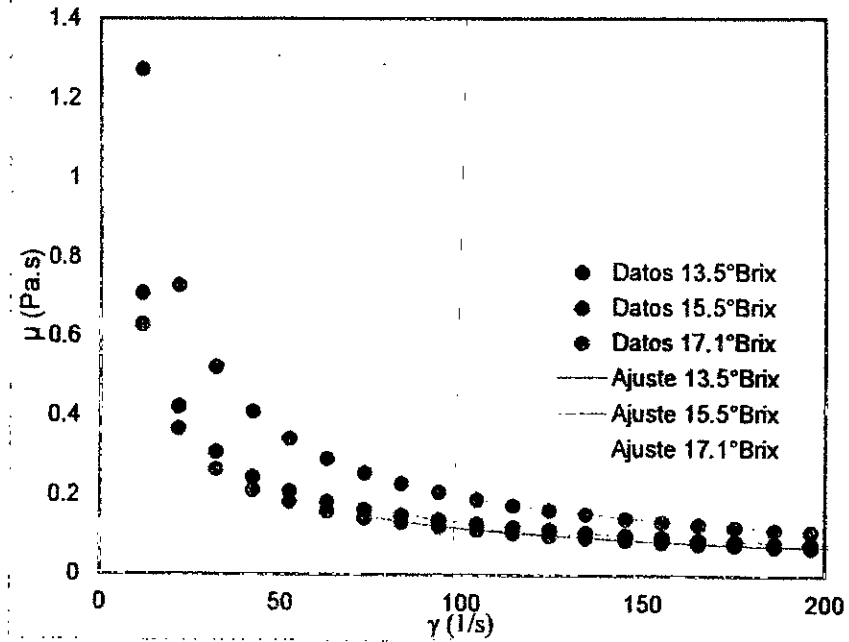
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.23: Viscosidad del modelo Robertson Stiff



Fuente: Elaboración propia

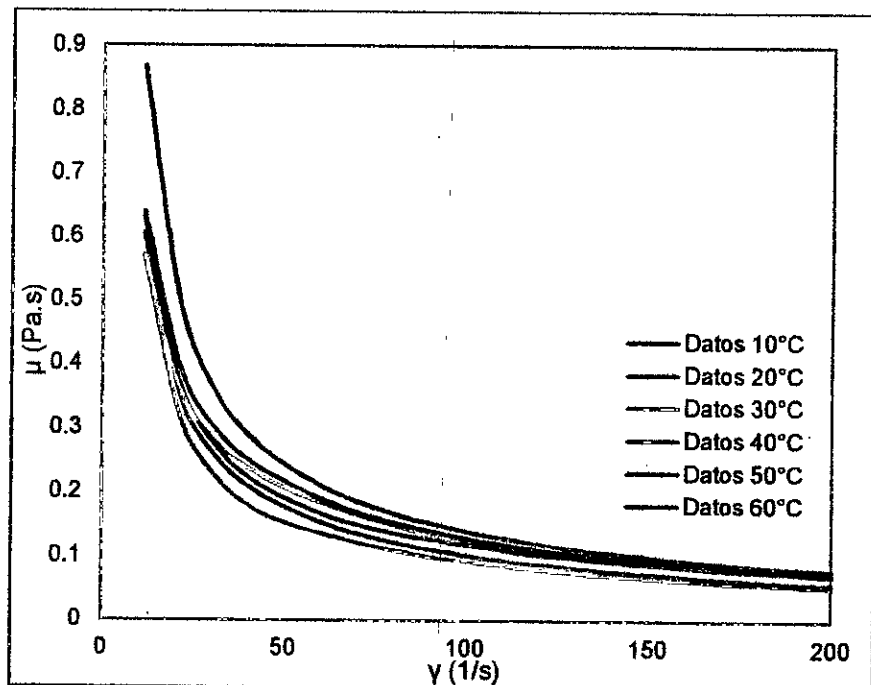
Gráfica N° 5.24: Viscosidad del modelo Sisko



Fuente: Elaboración propia

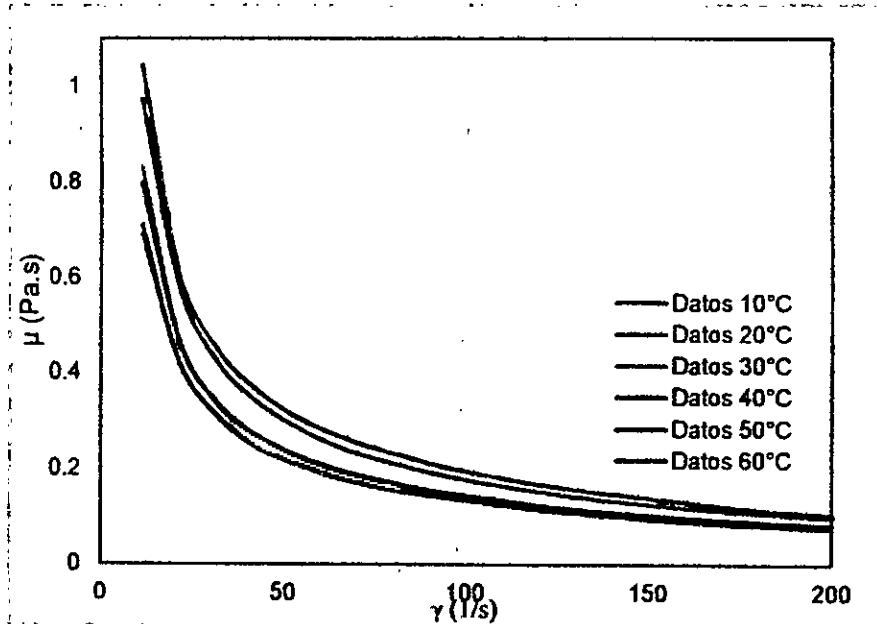
5.6.2. Viscosidad a concentración constante

Gráfica N° 5.25: Viscosidad a 13.5°Brix



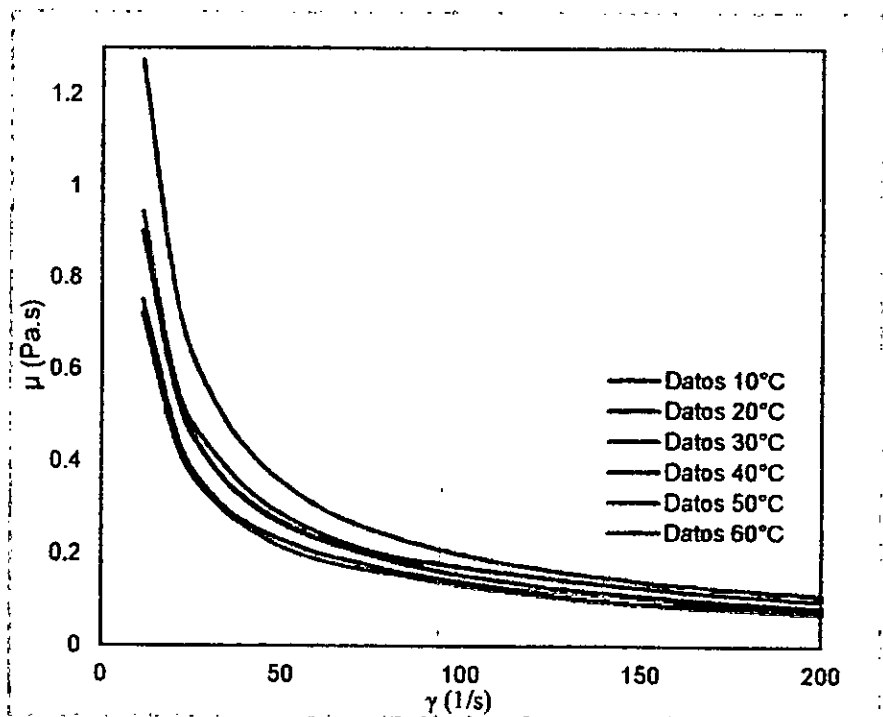
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.26: Viscosidad para 15.5°Brix



Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.27: Viscosidad para 17.1°Brix



Fuente: Elaboración propia

5.7. Cálculo de la energía de activación

Para el cálculo de la energía de activación se elaboró la tabla N° 5.10 en base a la ecuación de Arrhenius en su forma logarítmica, ecuación (5.11).

$$\ln(\mu_{ap}) = -\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + \ln(\mu_{ap0}) \quad (5.11)$$

Tabla N° 5.10: Calculo de la energía de activación

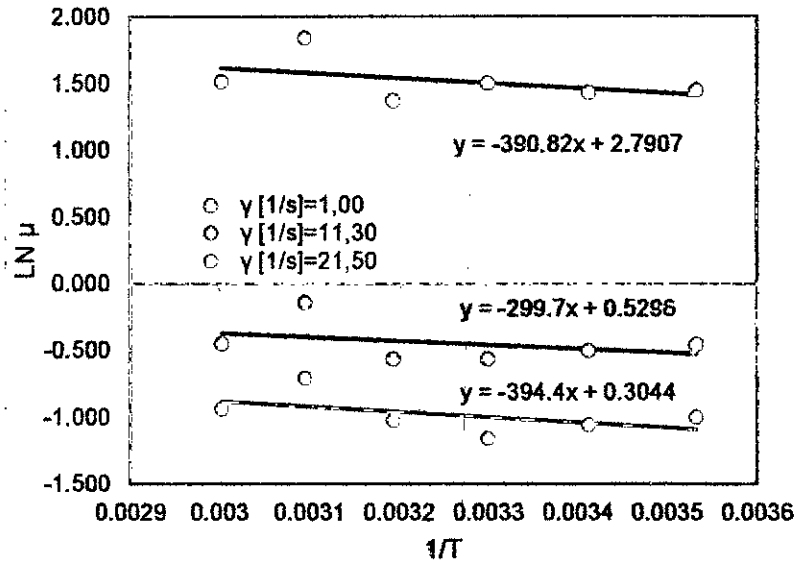
13,5°Brix					
γ [1/s]=1.00		γ [1/s]=11.30		γ [1/s]=21.50	
1/T	LN μ	1/T	LN μ	1/T	LN μ
0,003532	1,446919	0,003532	-0,45909	0,003532	-0,99866
0,003411	1,431312	0,003411	-0,50201	0,003411	-1,05716
0,003299	1,500624	0,003299	-0,56383	0,003299	-1,15703
0,003193	1,372181	0,003193	-0,56227	0,003193	-1,02165
0,003095	1,842552	0,003095	-0,14242	0,003095	-0,7072
0,003002	1,517129	0,003002	-0,44656	0,003002	-0,93507

Fuente: Elaboración propia

La tabla N° 5.10 solamente muestra los tres primeros valores de la serie velocidad de corte γ [1/s]; en el Anexo 2 se muestra la tabla adaptada para los valores de velocidad desde 1.00 (1/s) hasta 206.00 (1/s).

Se grafica la relación (LN μ) – (1/T) para obtener los valores de la pendiente (m) e intercepto (b):

Gráfica N°5.28: Cálculo de la energía de activación



Fuente: Elaboración propia

De la gráfica N° 5.27 el valor los valores de pendiente resulta

Para $\gamma [1/s]=1.00$: $m = -390.82$ y $b = 2.7907$

Para $\gamma [1/s]=11.30$: $m = -299.70$ y $b = 0.5296$

Para $\gamma [1/s]=21.50$: $m = -394.40$ y $b = 0.3044$

Con los cuales se calcularon la energía de activación y la constante de viscosidad según:

$$\text{Para } \gamma [1/s]=1.00 \quad E_a = -(-390.82) \frac{8.3144}{1000} = 3.2495 \text{ KJ}$$

$$\mu_{ap0} = e^{2.7907} = 16.2917 \text{ Pa.s}$$

$$\text{Para } \gamma [1/s]=11.30 \quad E_a = -(-299.70) \frac{8.3144}{1000} = 2.4918 \text{ KJ}$$

$$\mu_{ap0} = e^{0.5296} = 1.6982 \text{ Pa.s}$$

$$\text{Para } \gamma [1/s]=21.50 \quad E_a = -(-394.4) \frac{8.3144}{1000} = 3.2792 \text{ KJ}$$

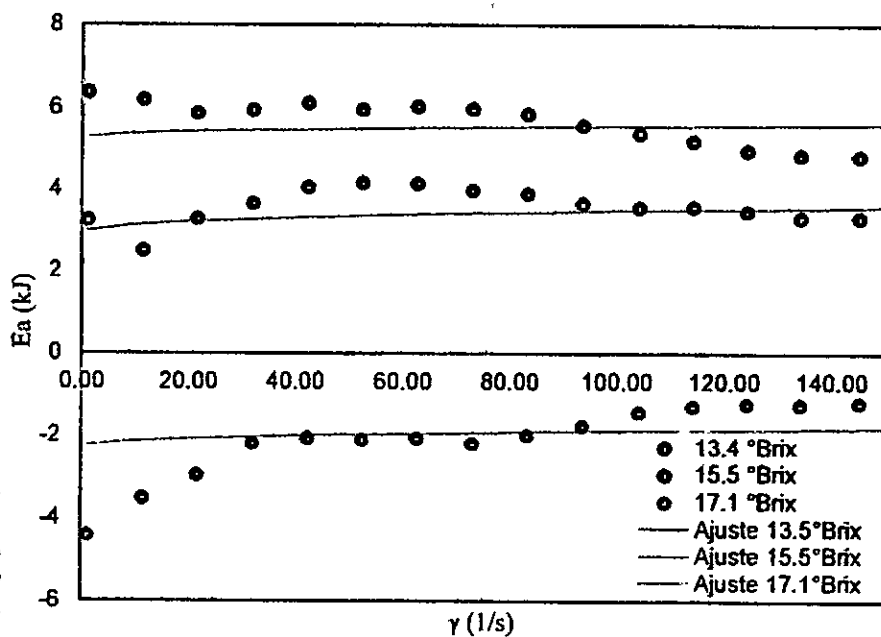
$$\mu_{ap0} = e^{0.3044} = 1.3558 \text{ Pa.s}$$

Esto se realizó para cada valor $\gamma [1/s]$ de los datos reológicos del zumo de mango Kent a 13.5°Brix. El procedimiento se hizo extensivo para las concentraciones de 15.5° y 17.1°Brix, ver Anexo 3.

5.7.1. Gráficos de energía de activación

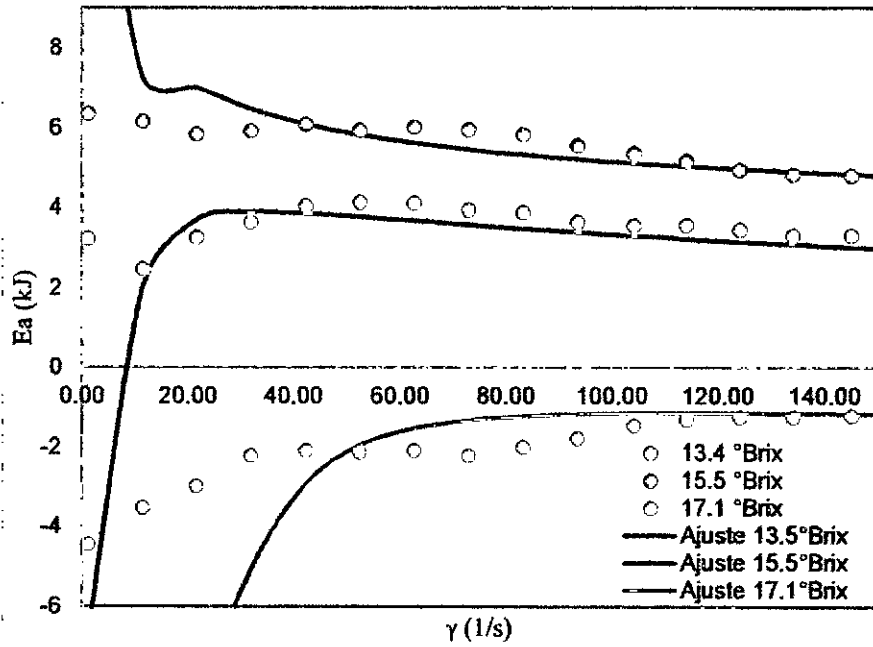
Se realizó la gráfica de la Energía de activación (KJ) – Velocidad de corte (1/s) para cada concentración de °Brix. Así mismo se graficó la energía de activación propuesta por cada modelo reológico

Gráfica N° 5.29: Energía de activación del modelo Casson



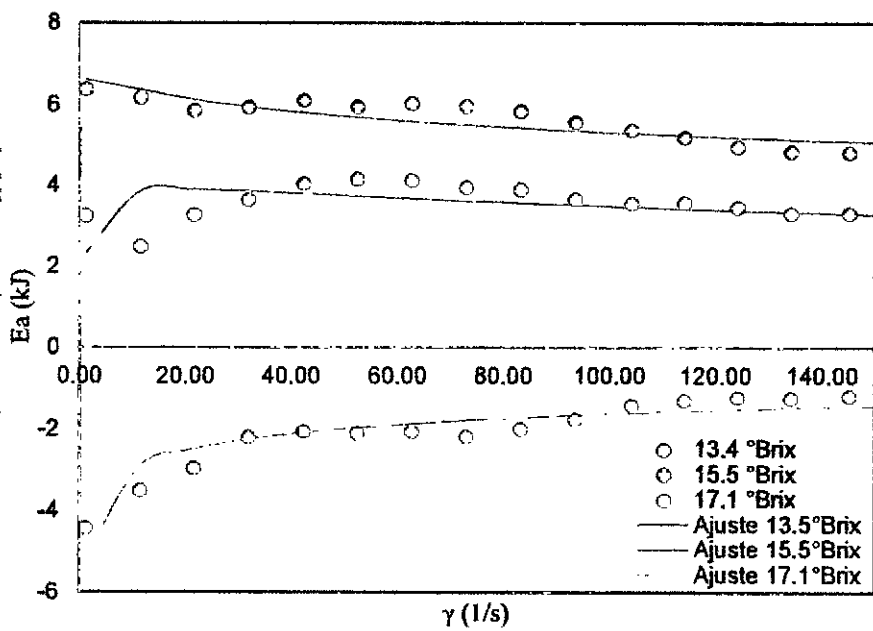
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.30: Energía de activación - Ellis



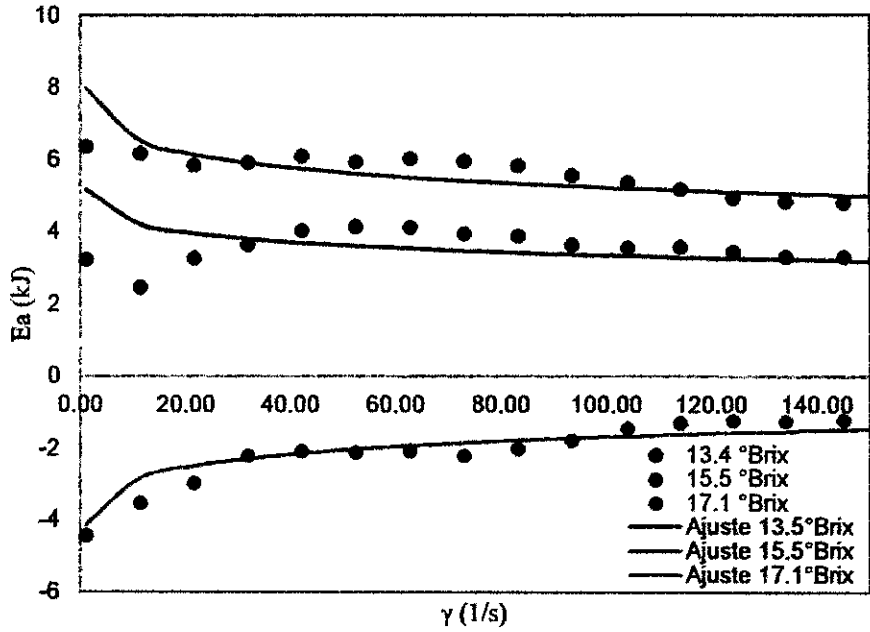
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.31: Energía de activación - Herschel Bulkley



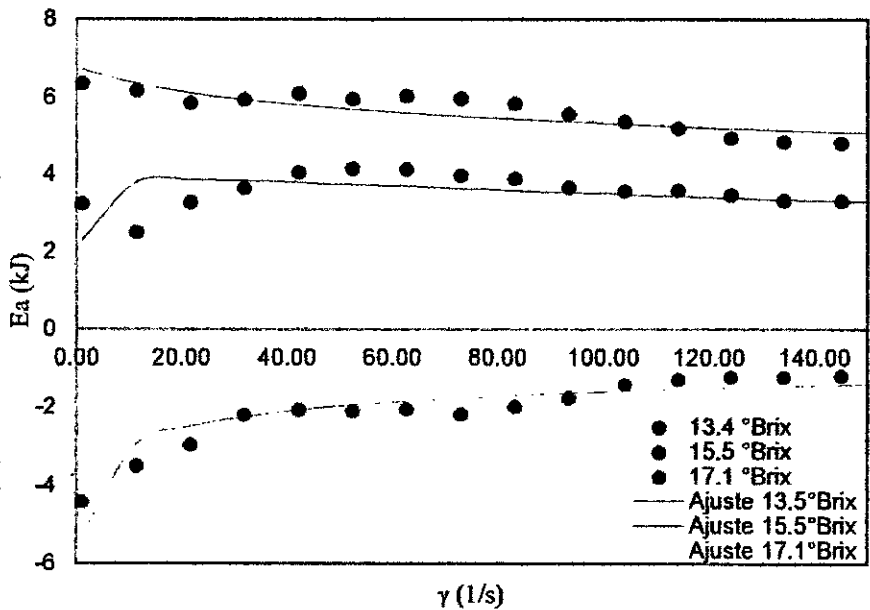
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.32: Energía de activación - Ley de Potencia



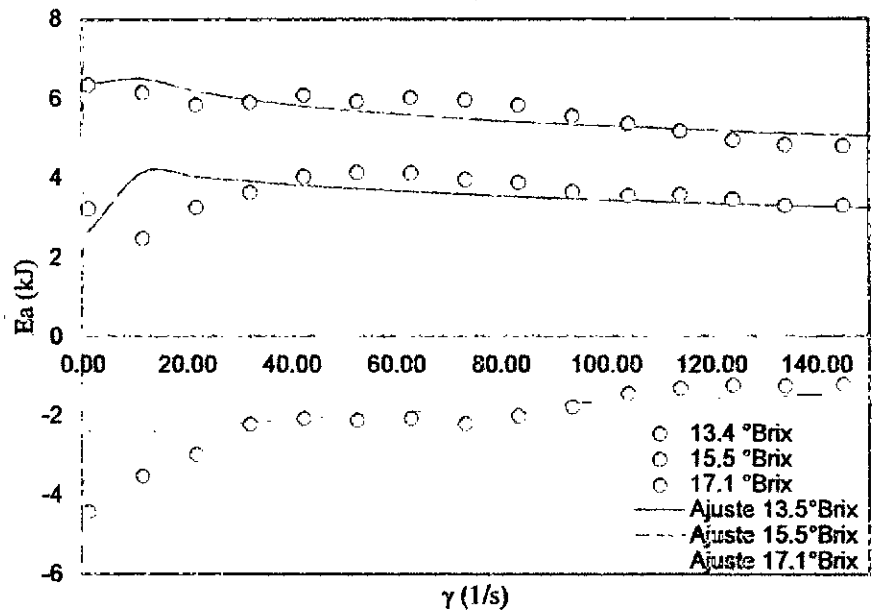
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.33: Energía de activación – Mizrahi-Berk



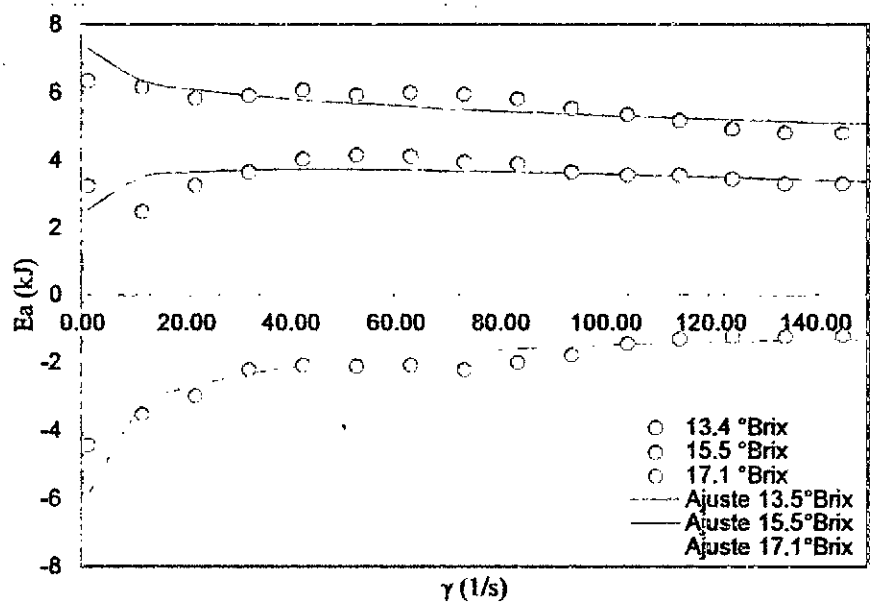
Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.34: Energía de activación - Robertson Stiff



Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 5.35: Energía de activación del modelo Sisko

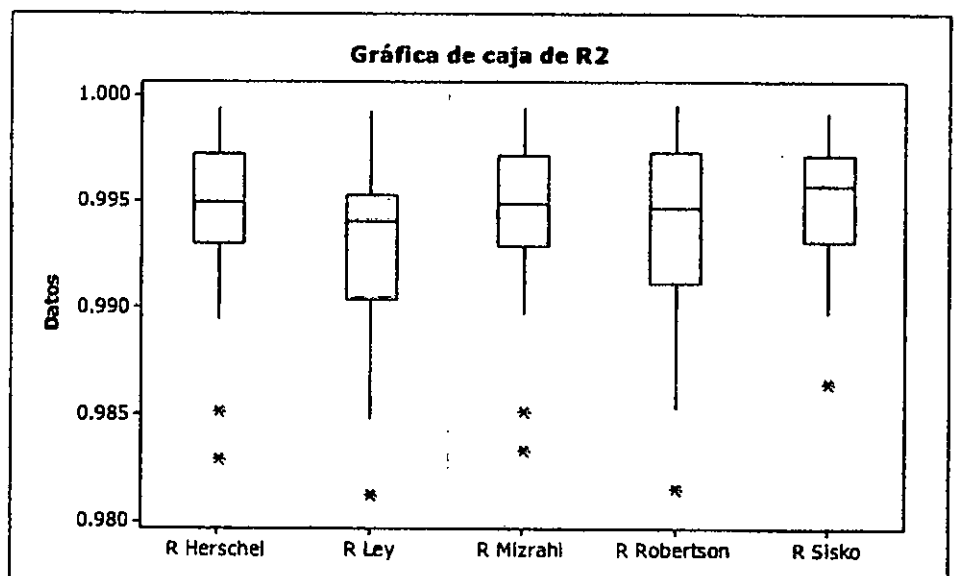
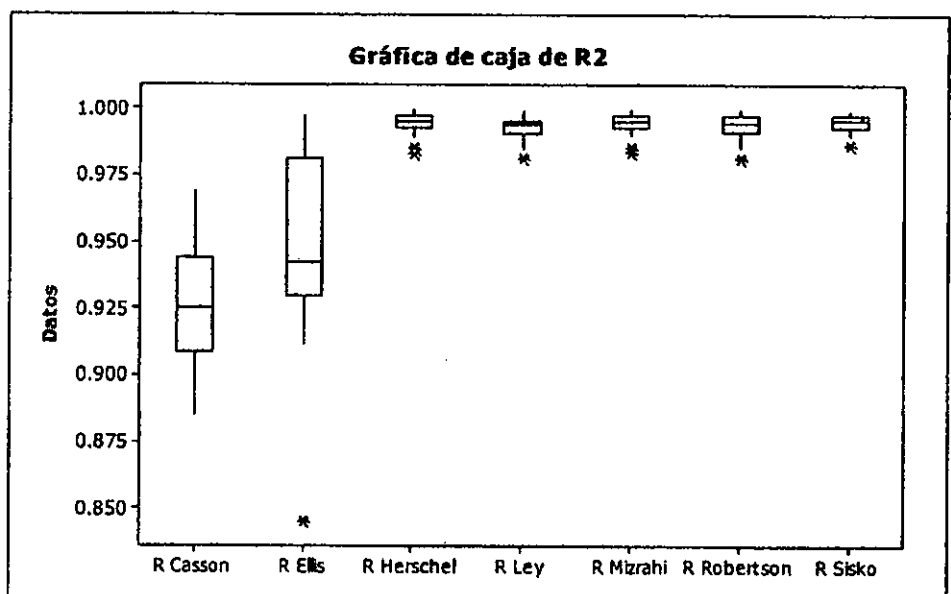


Fuente: Elaboración propia

5.8. Evaluación estadística de los modelos reológicos

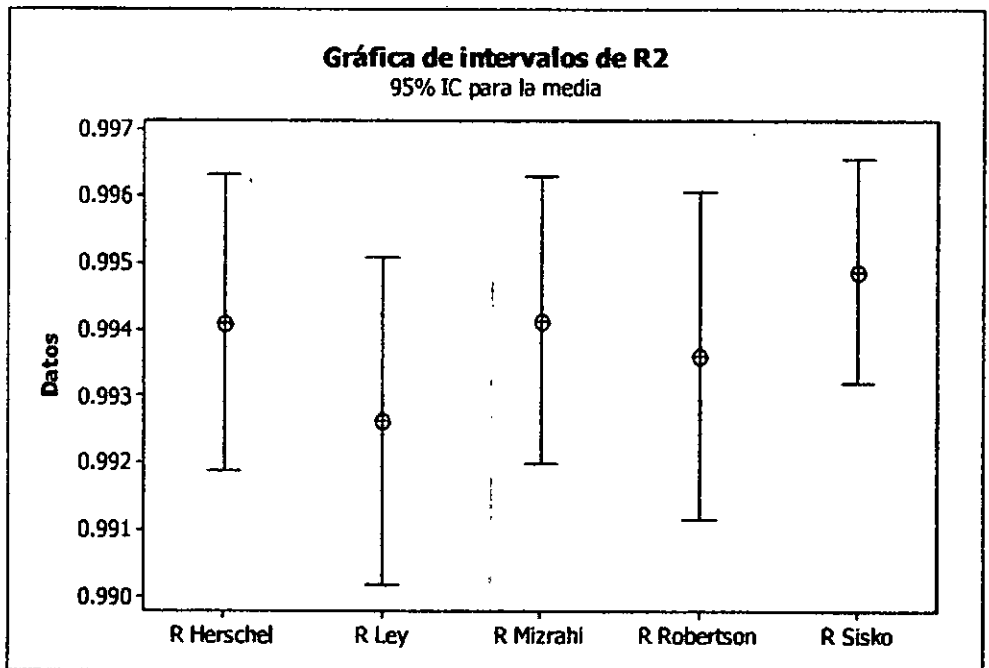
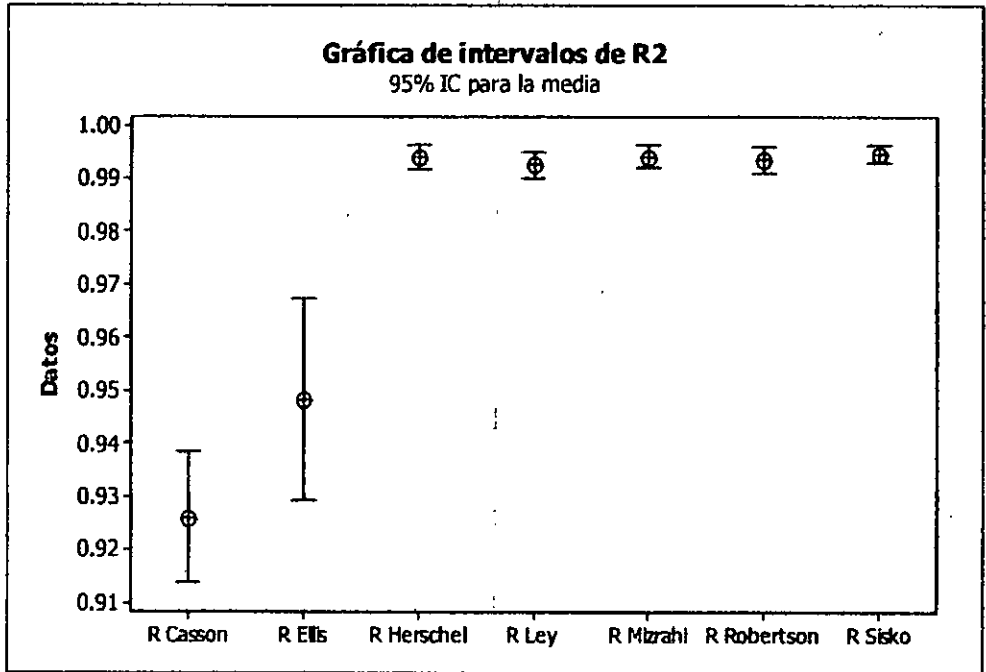
Se realizaron los diagramas de cajas y de intervalos para los parámetros R^2 y MSE con la finalidad de comparar el grado de correlación y la precisión que presentan los modelos reológicos.

Gráfica N° 5.36: Diagrama de cajas para R^2



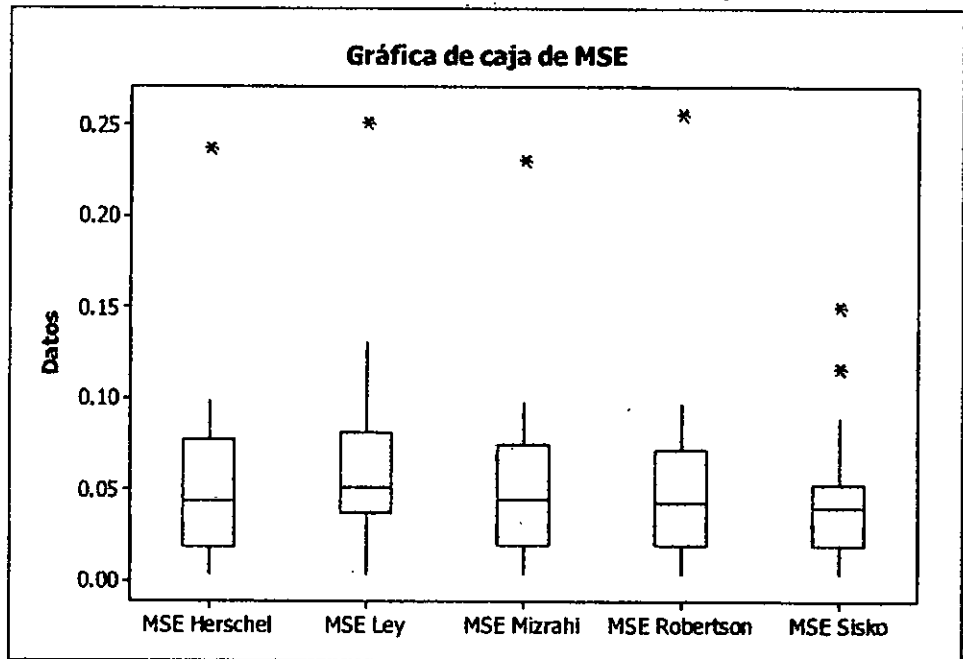
Fuente: Elaborado con Minitab 16

Gráfica N° 5.37: Diagrama de Intervalos para R²



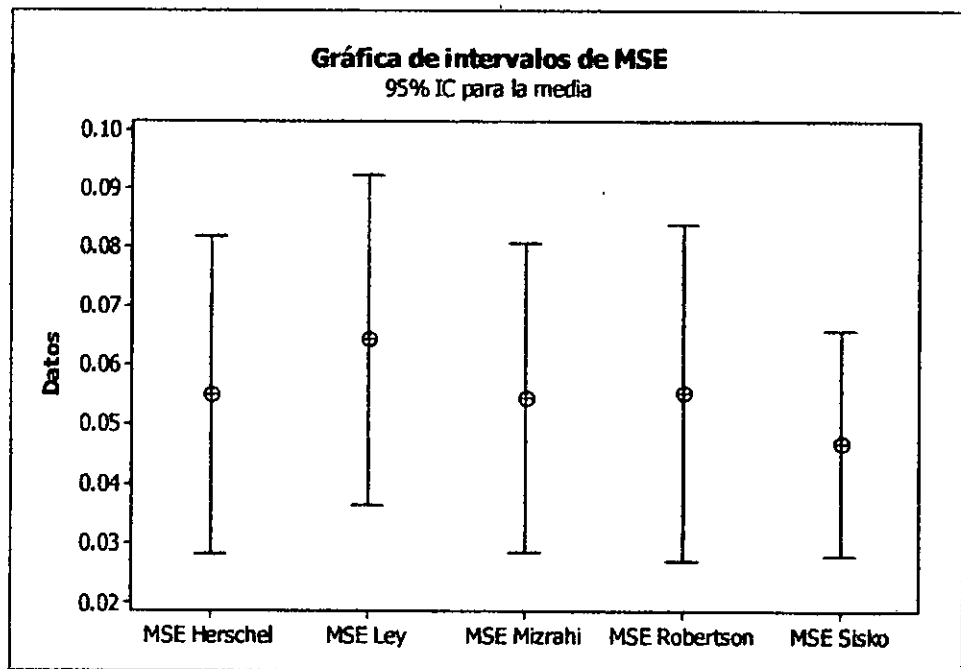
Fuente: Elaborado con Minitab 16

Gráfica N° 5.38: Diagrama de Cajas para MSE



Fuente: Elaborado con Minitab 16

Gráfica N° 5.39: Diagrama de Intervalos para MSE



Fuente: Elaborado con Minitab 16

VI. DISCUSION DE RESULTADOS

6.1. Contratación de hipótesis con los resultados

A partir de los datos obtenidos, aceptamos la hipótesis general que establece que el zumo de mango Kent posee un comportamiento reológico característico de los fluidos pseudoplásticos, el cual queda representado por los modelos: Casson, Ellis, Herschel-Bulkley, Ley de potencia, Mizrahi-Berk, Robertson-Stiff y Sisko. De los cuales para el modelo de Sisko se obtiene un valor promedio de $R^2 = 0.99487$ para un nivel de confianza del 95% y con margen de varianza mínimo $MSE = 0.04686$.

Tabla N° 6.1: Resultados experimentales del grado de ajuste de los modelos reológicos

Modelo	R^2		MSE	
	\bar{x}	Me	\bar{x}	Me
Ley de potencia	0.99263222	0.993975	0.06436722	0.051085
Robertson-Stiff	0.99361611	0.99461	0.05546889	0.04326
Casson	0.92623889	0.9252	0.62700661	0.6547465
Herschel-Bulkley	0.99410111	0.9949	0.05503278	0.043895
Mizrahi-Berk	0.99414167	0.99485	0.054585	0.044515
Sisko	0.99487222	0.99565	0.04686333	0.04039
Ellis	0.94862167	0.94259	38.9470772	23.2241

Tabla N° 6.2: Parámetros del modelo de Sisko

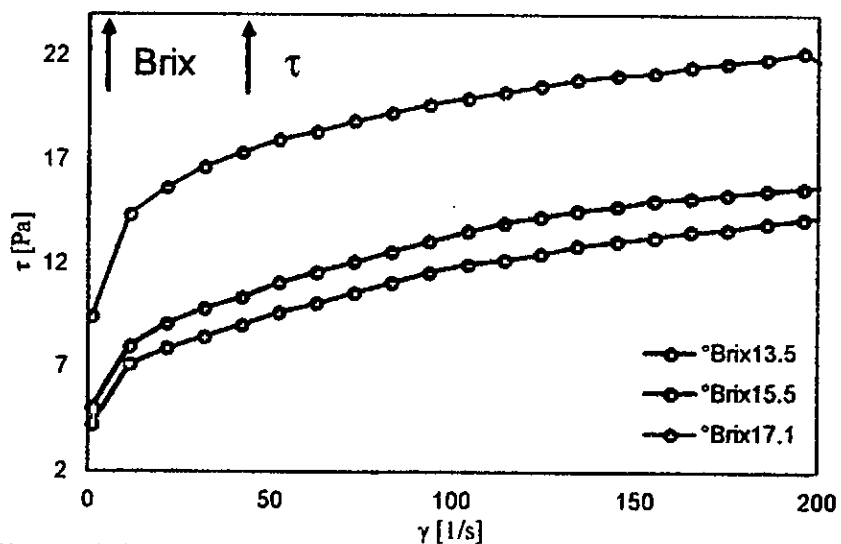
Sisko	$\tau = n_\alpha \gamma + K_S \gamma^{n_s}$					
T°C	°Brix	n_α	K_S	n_s	R ²	MSE
10	13.5	0.00516	3.88791	0.2303	0.9968	0.03176
	15.5	0.00331	4.60923	0.2243	0.99456	0.05359
	17.1	-0.00111	9.6156	0.1593	0.99916	0.00905
20	13.5	-0.00036	4.18446	0.1926	0.999	0.00397
	15.5	-0.0038	4.11043	0.2706	0.99571	0.05168
	17.1	-0.00702	4.84682	0.2355	0.99284	0.05421
30	13.5	0.00453	4.19935	0.1575	0.99027	0.03311
	15.5	0.00184	6.16584	0.1641	0.99632	0.02129
	17.1	-0.00396	6.66748	0.186	0.99592	0.02925
40	13.5	-0.01016	3.28125	0.3056	0.99484	0.04744
	15.5	-0.00396	5.23729	0.222	0.99481	0.04374
	17.1	-0.00519	4.83176	0.2209	0.98642	0.08974
50	13.5	0.0018	6.33918	0.1666	0.99828	0.01079
	15.5	0.01024	7.19426	0.201	0.99307	0.11723
	17.1	-0.00673	6.24497	0.2044	0.99809	0.01452
60	13.5	-0.00549	4.00916	0.2604	0.99559	0.03704
	15.5	-0.00712	6.53745	0.223	0.99634	0.04475
	17.1	-0.01384	5.31874	0.272	0.98968	0.15038

Los datos reológicos del zumo de mango Kent se obtuvieron en un reómetro Rheolab QC para el rango de temperatura de 10 a 60 °C, definido en función a la temperatura de conservación en cadena de frío (10°C) y la temperatura de tope (60°C) en la cual

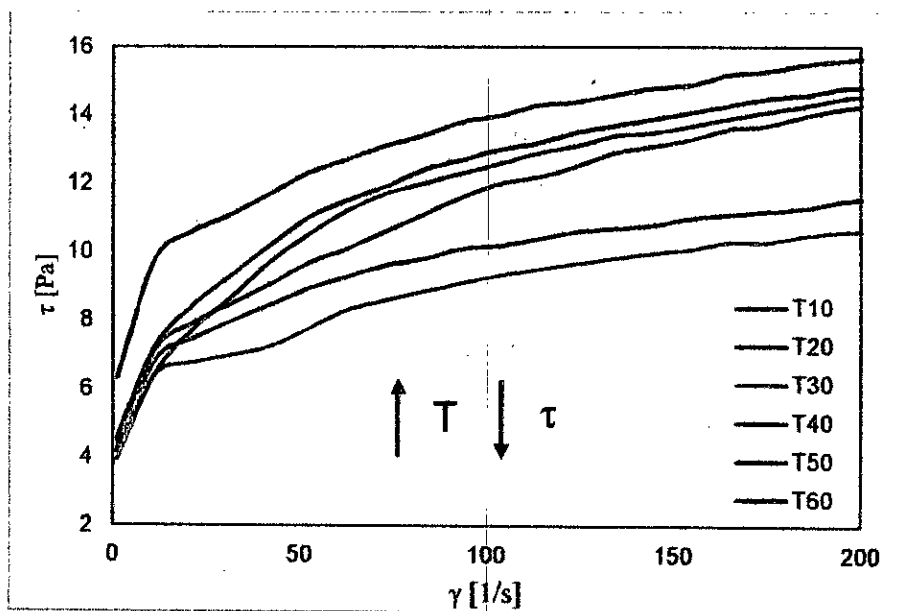
el producto empieza a ser afectado por el secado, pudiéndose presentar cambios en la estructura del fluido y para el rango de concentración de 13.5 a 17.1 °Brix, definido por el valor mínimo de concentración requerido para zumo (13.5 °Brix) y el valor natural de la fruta (17.1 °Brix).

Se comprobó que la temperatura y la concentración influyeron en la obtención de los datos reológicos, este hecho se refleja en los reogramas obtenidos de los cuales se observa que el esfuerzo de corte aumenta al aumentar la concentración y disminuye al aumentar la temperatura, tal como se muestra a continuación:

Grafica N°6.1: Influencia de la concentración



Grafica N°6.2: Influencia de la temperatura



Sin embargo, esta tendencia se ve afectada al incrementar la temperatura, pudiendo ser debido a cambios en la estructura interna del fluido consecuencia de una gelatinización del almidón presente en la pulpa del mango Kent.

Se demostró que existe una relación no lineal entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte. Esto se evidencia en la curvatura de los reogramas, los cuales quedan representados por modelos no lineales con índices de comportamiento de flujo menores a 1 ($n < 0.3$), característica propia de los fluidos pseudoplásticos; siendo estos modelos principalmente los propuestos por Sisko, Mizrahi-Berk y Herschel-Bulkley. La gráfica y tabla siguientes representan al fluido pseudoplástico.

Grafica N°6.3: Relación no lineal

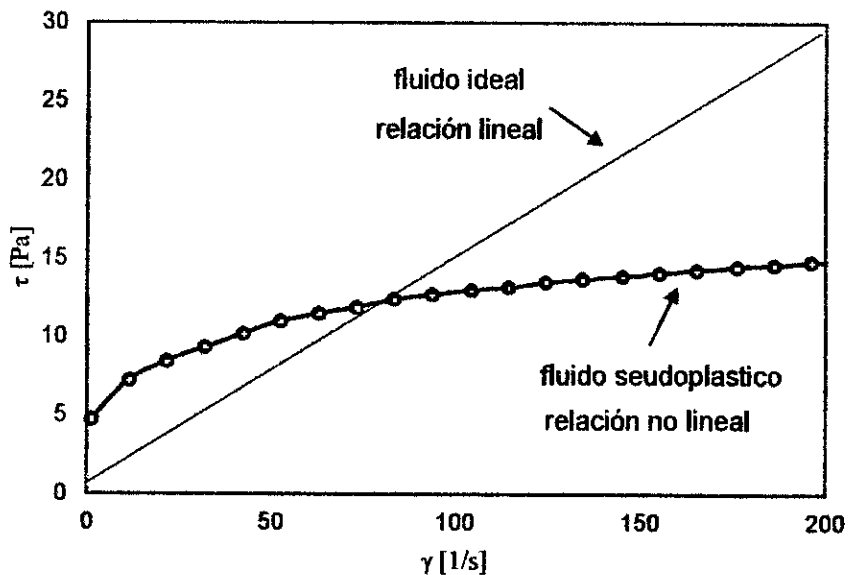


Tabla N° 6.3: Principales modelos pseudoplásticos

Modelo	Ecuación	Índice de comportamiento promedio
Sisko	$\tau = n_s \gamma + K_S \gamma^{n_s}$	$n_s = 0.21645$
Mizrahi-Berk	$\tau^{0.5} = \tau_{0M} + K_M \gamma^{n_M}$	$n_M = 0.106668$
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_{0H} + K_H \gamma^{n_H}$	$n_H = 0.21238$

De lo expuesto se da validez a las hipótesis planteadas inicialmente.

6.2. Contrastación de resultados con otros estudios similares

Quintáns cita que, el modelo de Sisko es utilizado en la industria alimentaria, en operaciones de bombeo y mezclado de fluidos bajo un régimen de altos gradientes de velocidad considerando

un comportamiento newtoniano y no newtoniano determinado por las condiciones de operación.

Vargas et al, trabajó la pulpa de mango Haden a condiciones de 25°C y concentraciones de 7, 12, 17, 22 y 27 °Brix y observó un comportamiento pseudoplástico haciendo un análisis bajo el modelo de Ley de potencia.

Rainiere, Gamboa et al, haciendo un análisis reológico para pulpa de mango Keitt y Edward concluyen que el modelo de Mizrahi-Berk presenta una mejor correlación de sus datos investigados, a su vez describen el comportamiento pseudoplástico de la pulpa.

Estas afirmaciones confirman la hipótesis de que el mango posee un comportamiento pseudoplástico lo cual es concordante con la presente tesis; sin embargo los modelos propuestos por los autores Vargas et al, y Rainiere, Gamboa et al, difieren del modelo propuesto en esta investigación, lo cual es razonable debido a que se trata de investigaciones en diferentes especies de mango y va de acorde a lo indicado por Steffe J.F. y Dauberth C.R. al citar que las propiedades reológicas de los fluidos pueden variar considerablemente, incluso dentro de categorías de un mismo producto.

VII. CONCLUSIONES

Se concluye que el modelo de Sisko, representado por la ecuación:

$$\tau = n_{\alpha}\dot{\gamma} + K_S\dot{\gamma}^{n_s},$$
 predice mejor el comportamiento reológico del zumo de

Mango Kent con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.99487$ para un nivel de confianza del 95% y con margen de varianza mínimo $MSE = 0.04686$ en referencia a los demás modelos estudiados en la presente investigación.

Los datos reológicos se obtuvieron para las concentraciones de 13.5, 15.5 y 17.1°Brix, a temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 y 60°C, analizados en el sistema de cilindros concéntricos del reómetro Rheolab QC, hallándose valores de velocidad de corte y esfuerzo de corte que representan las características reológicas inherentes de la materia prima.

Se determinó que para los rangos de temperatura y concentración trabajados, el índice de comportamiento de flujo presenta valores menores a 1 ($n < 0.3$), característica de un fluido no newtoniano con comportamiento pseudoplástico, lo cual queda complementado con la verificación de la disminución de la viscosidad aparente a medida que se incrementa el gradiente de deformación.

Para bajas concentraciones del zumo (13.5 °Brix) el esfuerzo de corte disminuye al aumentar la temperatura, esto es debido al aumento de la

energía cinética de las partículas del fluido lo cual favorece al movimiento. Al aumentar la concentración (15.5 y 17.1 °Brix) y la temperatura hasta 40°C se presenta disminución del esfuerzo de corte: sin embargo, por encima de los 40°C el esfuerzo de corte presenta un incremento reflejando otro comportamiento lo cual nos indica la deformación de la materia prima.

VIII. RECOMENDACIONES

Extender el estudio reológicos de materias primas nativas y darle mayor valor agregado a sus subproductos

Extender el estudio orientado a los cambios en la estructura interna que afecten a las mediciones del esfuerzo y velocidad de corte.

Investigar condiciones que brinden estabilidad al zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.) más allá de los 40°C para optimizar el proceso.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

LIBROS

1. ARANA I., **PHYSICAL PROPERTIES OF FOODS**, USA, CRC Press, 2012
2. BARNES H.A., **A HANBOOK OF ELEMENTARY RHEOLOGY**, ENGLAND, Cambrian Printers, 1th Edition, 2000
3. BARNES H.A., HUTTON J.F., WALTERS K., **AN INTRODUCTION TO RHEOLOGY**, NETHERLANDS, Elsevier Science Publisher, 3th edition, 1993
4. BOURNE M.C. **FOOD TEXTURE AND VISCOSITY**, USA, ACADEMIC PRESS, 1th Edition, 1982
5. HELDMAN D.R., SINGH R.P., **FOOD PROCESS ENGINEERING**, USA, Avi Publishing Co., 2nd Edition, 1981
6. KOSTERMANS A.J., BOMPARD J.M., **THE MANGOES**, London, Academic Press Limited, 1993
7. LITZ R.E. **THE MANGO**, USA, CAB International, 2nd Edition, 2009
8. MACOSKO C.W., **RHEOLOGY**, CANADA, WILEY-VCH, 1th Edition, 1994
9. MENDEZ M.G., NUÑEZ M.C., SOLORZA J., **INTRODUCCION A LA REOLOGIA**, MEXICO, Instituto Politécnico Nacional, 1ra Edición, 2001

10. RAO M.A., RIZVI S.S., DATTA A.K., **ENGINEERING PROPERTIES OF FOOD**, EUA, CRC Press, 4th Edition. 2014
11. RAO M.A., **RHEOLOGY OF FLUID, SEMISOLID, AND SOLID FOODS**, EUA, Springer, 3th Edition. 2014
12. SAHIN S., SUMNU S.G., **PHYSICAL PROPERTIES OF FOODS**, USA, Springer, 2006
13. SARAVACOS G.D., MAROULIS Z.B., **TRANSPORT PROPERTIES OF FOODS**. EUA. Ed. Marcel Dekker. Primera Edición 2001
14. SIDDIQ M. **TROPICAL AND SUBTROPICAL FRUITS**. INDIA. Wiley-Blackwell, 1th Edition. 2012
15. SINHA N.K., SIDHU J.S., BARTA J. **HANDBOOK OF FRUIT AND FRUIT PROCESSING INDIA**. Wiley-Blackwell, 2nd Edition. 2012
16. STEFFE J.F. **RHEOLOGICAL METHODS IN FOOD PROCESS ENGINEERING**. USA. Freeman Press. Segunda Edición. 1992
17. STEFFE J.F., DAUBERTH C.R., **BIOPROCESSING PIPELINES: RHEOLOGY AND ANALYSIS**. USA. Freeman Press. 1st Edition, 2006
18. TSCHEUSCHNER H. D. **FUNDAMENTOS DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS**, ESPAÑA, Ed. ACRIBIA, 2th Edition, 2001
19. VALENTAS K.J., ROTSTEIN E., SINGH R.P., **FOOD ENGINEERING PRACTICE**, USA, CRC Press, 1997
20. WELTI J., **TRANSPORT PHENOMENA IN FOOD PROCESSING**, USA, CRC Press, 2003

21. WELTI J., BARBOSA G. V., AGUILERA J.M. **ENGINEERING AND FOOD FOR THE 21ST CENTURY**, USA, CRC Press, 2002
22. YAHIA E.M., **POSTHARVEST BIOLOGY AND TECHNOLOGY OF TROPICAL AND SUBTROPICAL FRUITS, VOL 3**, UK, Woodhead Publishing Limited, 1th Edition. 2011

REVISTAS

1. BARBOSA G.V., TABILO G., **RHEOLOGY FOR THE FOOD INDUSTRY**, Journal of Food Engineering. Vol 67. 2005
2. DA CRUZ A.M., VIEIRA C., QUARESMA I., MELLER H., **PROPIEDADES REOLÓGICAS DE JUGO DE BURITI (MAURITIA FLEXUOSA)** Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, v.38, n.1, p.176-186, 2016
3. MAGERRAMOV M.A. **VISCOSITY OF TANGERINE AND LEMON JUICES AS A FUNCTION OF TEMPERATURE AND CONCENTRATION**. International Journal of Food Science and Technology. Vol.42, 2007
4. SARAVACOS G.D. **EFFECT OF TEMPERATURE ON VISCOSITY OF FRUIT JUICES AND PUREES**. Journal of Food Science. Vol.35. 1970
5. QUINTERO V.D. **EVALUATION OF THE VISCOSITY AND THE COLOR OF COMMON MANGO PULP (Mangifera L.) ENZIMATICALLY TREATED**. Temas Agrarios. Vol.17, 2012

6. **VARGAS F., SALAS F., DUARTE C. ANALES CIENTIFICOS DE LA UNIVERSIDAD LA MOLINA.** Revista Multidisciplinaria. Vol.66. 2006

TESIS

1. **GAMBOA P. W., SUYON J.A., EFECTO DE LA LIOFILIZACION CON ENCAPSULANTES SOBRE EL COMPORTAMIENTO REOLOGICO DE LA PULPA DE MANGO (Mangifera indica L.) DE VARIEDAD EDWARD,** Ingeniero Industrial, PERU, Universidad Nacional del Santa, 2018
2. **QUINTANS L. C., REOLOGIA DE PRODUCTOS ALIMENTARIOS,** Doctora en Ciencias Químicas, ESPAÑA, Universidad de Santiago de Compostela, 2008
3. **VIDAL J.R., COMPORTAMIENTO REOLOGICO DE PULPA DE MANGO (Mangifera indica L. – Keitt),** Doctora en Ingeniería de los Alimentos, BRASIL, Universidad Estatal de Campinas, 2000

ANEXOS

a. Matriz de consistencia

TITULO: DETERMINACIÓN DE LOS MODELOS REOLÓGICOS ASOCIADOS AL ZUMO DE MANGO KENT (Mangífera indica L)

Presentado por: Daril Giovanni Martínez Hilario; Victor Andrés Novoa Revelo

Asesor: Luis Américo Carrasco Venegas

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
¿Cuáles son los modelos reológicos asociados al zumo de mango Kent (Mangífera indica L.)?	Determinar los modelos reológicos asociados al zumo de mango Kent (Mangífera indica L.).	El zumo de mango Kent (Mangífera indica L) tiene un comportamiento reológico característico de los fluidos pseudoplásticos.	$Y =$ Modelos reológicos asociados al zumo de mango Kent (Mangífera indica L).	Reproducibilidad de los datos experimentales mediante los modelos reológicos asociados al comportamiento del zumo de mango Kent (Mangífera indica L).	Los índices de correlación múltiple y análisis de la varianza.	- Análisis estadístico - Gráfico - Revisión bibliográfica
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	MÉTODO
1. ¿Cómo se obtienen los datos reológicos asociados al zumo de mango Kent (Mangífera indica L.)?	1. Obtener los datos reológicos asociados al zumo de mango Kent (Mangífera indica L.)	1. Los datos reológicos del zumo de mango Kent (Mangífera indica L.) se obtienen con el reómetro rotacional mediante un batch de ensayos reológicos a temperatura y concentración definida.	$X_1 =$ Datos reológicos asociados al zumo de mango Kent (Mangífera indica L).	Características inherentes del fluido.	- Velocidad de corte - Esfuerzo de corte	- Diseño experimental - Revisión bibliográfica
2. ¿Qué efecto tienen la temperatura y la concentración del zumo de mango Kent (Mangífera indica L.) en la obtención de los datos reológicos?	2. Estudiar el efecto de la temperatura y la concentración del zumo de mango Kent (Mangífera indica L.) en la obtención de los datos reológicos.	2. La temperatura y la concentración influyen significativamente en los valores de esfuerzo de corte y velocidad de corte asociados al zumo de mango Kent (Mangífera indica L.).	$X_2 =$ Temperatura y concentración del zumo de mango Kent (Mangífera indica L.) en la obtención de los datos reológicos.	Variables de proceso para la obtención de los datos reológicos.	- °C - °Brix	- Ensayos de laboratorio - Revisión bibliográfica
3. ¿Cuál es la relación numérica entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte determinado experimentalmente para el zumo de mango Kent (Mangífera indica L.) ?	3. Determinar en forma experimental la relación numérica entre la velocidad de corte y el esfuerzo de corte para el zumo de mango Kent (Mangífera indica L.).	3. Existe una relación no lineal entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte asociado al zumo de mango Kent (Mangífera indica L.).	$X_3 =$ La relación no lineal entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte asociado al zumo de mango Kent (Mangífera indica L.).	Análisis de la relación entre la velocidad de corte y esfuerzo de corte.	- Diferencias respecto a la relación lineal. - Índice de correlación y varianza	- Análisis estadístico - Revisión bibliográfica.

RELACIÓN DE VARIABLES : $Y = f(X_1, X_2, X_3)$

- Y = Modelos reológicos asociados al zumo de mango Kent (Mangífera indica L.).
- X1 = Datos reológicos asociados al zumo de mango Kent (Mangífera indica L.).
- X2 = Temperatura y concentración del zumo de mango Kent (Mangífera indica L.) en la obtención de los datos reológicos.
- X3 = La relación no lineal entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte asociado al zumo de mango Kent (Mangífera indica L.).

b. Datos reológicos del zumo de mango Kent

Datos reológicos del zumo de mango Kent (*Mangifera indica L.*) a 10°C

Txy1: 10°C y 13.5 °Brix		Txy2: 10°C y 15.5°Brix		Txy3: 10°C y 17.1°Brix	
γ [1/s]	τ [Pa]	γ [1/s]	τ [Pa]	γ [1/s]	τ [Pa]
1.00	4.25	1.00	5.05	1.00	9.45
11.30	7.14	11.30	8.03	11.30	14.40
21.50	7.92	21.50	9.12	21.50	15.70
31.80	8.49	31.80	9.85	31.80	16.70
42.10	9.06	42.10	10.40	42.10	17.40
52.30	9.67	52.30	11.10	52.30	18.00
62.60	10.10	62.60	11.60	62.60	18.40
72.90	10.60	72.90	12.10	72.90	18.90
83.10	11.10	83.10	12.60	83.10	19.30
93.40	11.60	93.40	13.10	93.40	19.70
104.00	12.00	104.00	13.60	104.00	20.00
114.00	12.20	114.00	14.00	114.00	20.30
124.00	12.50	124.00	14.30	124.00	20.60
134.00	12.90	134.00	14.60	134.00	20.90
145.00	13.10	145.00	14.80	145.00	21.10
155.00	13.30	155.00	15.10	155.00	21.20
165.00	13.60	165.00	15.20	165.00	21.50
175.00	13.70	175.00	15.40	175.00	21.70
186.00	14.00	186.00	15.60	186.00	21.90
196.00	14.20	196.00	15.70	196.00	22.20
206.00	14.40	206.00	15.90	206.00	21.30

Datos reológicos del zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.) a 20°C

Txy4: 20°C y 13.5°Brix		Txy5: 20°C y 15.5°Brix		Txy6: 20°C y 17.1°Brix	
γ [1/s]	τ [Pa]	γ [1/s]	τ [Pa]	γ [1/s]	τ [Pa]
1.00	4.18	1.00	4.92	1.00	5.34
11.30	6.84	11.30	7.82	11.30	8.51
21.50	7.47	21.50	9.06	21.50	9.52
31.80	7.98	31.80	9.97	31.80	10.20
42.10	8.46	42.10	10.90	42.10	10.90
52.30	8.93	52.30	11.60	52.30	11.70
62.60	9.28	62.60	12.00	62.60	12.30
72.90	9.61	72.90	12.60	72.90	13.00
83.10	9.81	83.10	13.20	83.10	13.50
93.40	10.10	93.40	13.70	93.40	13.80
104.00	10.20	104.00	14.20	104.00	14.10
114.00	10.40	114.00	14.50	114.00	14.30
124.00	10.60	124.00	14.90	124.00	14.40
134.00	10.70	134.00	15.20	134.00	14.60
145.00	10.80	145.00	15.40	145.00	14.70
155.00	11.00	155.00	15.70	155.00	14.80
165.00	11.10	165.00	15.90	165.00	15.00
175.00	11.20	175.00	16.10	176.00	15.10
186.00	11.30	186.00	16.30	186.00	15.20
196.00	11.50	196.00	16.40	196.00	15.30
206.00	11.60	206.00	16.60	206.00	15.40

Datos reológicos del zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.) a 30°C

Txy7: 30°C y 13.5°Brix		Txy8:30°C y 15.5°Brix		Txy9: 30°C y 17.1°Brix	
γ [1/s]	τ [Pa]	γ [1/s]	τ [Pa]	γ [1/s]	τ [Pa]
1.00	4.48	1.00	6.34	1.00	6.77
11.30	6.43	11.30	9.38	11.30	10.70
21.50	6.76	21.50	10.10	21.50	11.60
31.80	6.99	31.80	10.60	31.80	12.20
42.10	7.24	42.10	11.10	42.10	12.80
52.30	7.76	52.30	11.70	52.30	13.50
62.60	8.31	62.60	12.20	62.60	14.10
72.90	8.60	72.90	12.70	72.90	14.70
83.10	8.86	83.10	13.10	83.10	15.10
93.40	9.11	93.40	13.50	93.40	15.40
104.00	9.34	104.00	13.50	104.00	15.60
114.00	9.51	114.00	13.70	114.00	15.80
124.00	9.67	124.00	13.90	124.00	15.90
134.00	9.83	134.00	14.10	134.00	16.10
145.00	9.98	145.00	14.30	145.00	16.30
155.00	10.10	155.00	14.40	155.00	16.40
165.00	10.30	165.00	14.60	165.00	16.60
175.00	10.30	176.00	14.70	175.00	16.70
186.00	10.50	186.00	14.90	186.00	16.80
196.00	10.60	196.00	15.10	196.00	17.10
206.00	10.60	206.00	15.10	206.00	17.10

Datos reológicos del zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.) a 40°C

Txy10: 40°C y 13.5°Brix		Txy11: 40°C y 15.5°Brix		Txy12: 40°C y 17.1°Brix	
γ [1/s]	τ [Pa]	γ [1/s]	τ [Pa]	γ [1/s]	τ [Pa]
1.00	3.94	1.00	5.61	1.00	5.22
11.30	6.44	11.30	9.01	11.30	8.18
21.50	7.74	21.50	9.90	21.50	9.10
31.80	8.68	31.80	10.80	31.80	9.90
42.10	9.71	42.10	11.50	42.10	10.50
52.30	10.50	52.30	12.20	52.30	10.90
62.60	11.20	62.60	12.80	62.60	11.50
72.90	11.70	72.90	13.50	72.90	12.20
83.10	12.00	83.10	13.80	83.10	12.90
93.40	12.30	93.40	14.20	93.40	13.10
104.00	12.60	104.00	14.60	104.00	13.30
114.00	12.90	114.00	14.80	114.00	13.50
124.00	13.10	124.00	15.00	124.00	13.60
134.00	13.50	134.00	15.10	134.00	13.60
145.00	13.50	145.00	15.30	145.00	13.70
155.00	13.70	155.00	15.40	155.00	13.80
165.00	13.90	165.00	15.60	165.00	13.90
175.00	14.10	176.00	15.80	175.00	14.10
186.00	14.30	186.00	15.90	186.00	14.20
196.00	14.50	196.00	16.00	196.00	14.30
206.00	14.60	206.00	16.30	206.00	13.90

Datos reológicos del zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.) a 50°C

Txy13: 50°C y 13.5°Brix		Txy14: 50°C y 15.5°Brix		Txy15: 50°C y 17.1°Brix	
γ [1/s]	τ [Pa]	γ [1/s]	τ [Pa]	γ [1/s]	τ [Pa]
1.00	6.30	1.00	7.58	1.00	6.36
11.30	9.80	11.30	11.80	11.30	10.20
21.50	10.60	21.50	13.00	21.50	11.30
31.80	11.10	31.80	14.30	31.80	12.20
42.10	11.70	42.10	15.50	42.10	13.00
52.30	12.30	52.30	16.40	52.30	13.70
62.60	12.70	62.60	17.30	62.60	14.30
72.90	13.10	72.90	18.10	72.90	14.70
83.10	13.50	83.10	18.80	83.10	15.00
93.40	13.80	93.40	19.20	93.40	15.30
104.00	14.00	104.00	19.70	104.00	15.60
114.00	14.30	114.00	20.00	114.00	15.80
124.00	14.40	124.00	20.20	124.00	15.90
134.00	14.60	134.00	20.50	134.00	16.00
145.00	14.80	145.00	20.80	145.00	16.20
155.00	14.90	155.00	21.00	155.00	16.40
165.00	15.20	165.00	20.90	165.00	16.50
176.00	15.30	175.00	20.70	175.00	16.70
186.00	15.50	186.00	20.70	186.00	16.90
196.00	15.60	196.00	20.80	196.00	17.00
206.00	15.70	206.00	20.90	206.00	17.20

Datos reológicos del zumo de mango Kent (*Mangifera indica* L.) a 60°C

Txy16: 60°C y 13.5°Brix		Txy17: 60°C y 15.5°Brix		Txy18: 60°C y 17.1°Brix	
$\dot{\gamma}$ [1/s]	τ [Pa]	$\dot{\gamma}$ [1/s]	τ [Pa]	$\dot{\gamma}$ [1/s]	τ [Pa]
1.00	4.55	1.00	7.05	1.00	6.18
11.30	7.23	11.30	11.00	11.30	10.20
21.50	8.44	21.50	12.50	21.50	11.70
31.80	9.33	31.80	13.50	31.80	13.20
42.10	10.20	42.10	14.50	42.10	13.90
52.30	11.00	52.30	15.30	52.30	14.50
62.60	11.50	62.60	15.90	62.60	14.90
72.90	11.90	72.90	16.50	72.90	15.30
83.10	12.40	83.10	17.10	83.10	15.90
93.40	12.70	93.40	17.50	93.40	16.70
104.00	13.00	104.00	17.90	104.00	17.50
114.00	13.20	114.00	18.20	114.00	18.00
124.00	13.50	124.00	18.40	124.00	18.40
134.00	13.70	134.00	18.70	134.00	18.80
145.00	13.90	145.00	18.90	145.00	19.00
155.00	14.10	155.00	19.20	155.00	19.30
165.00	14.30	165.00	19.30	165.00	19.40
176.00	14.50	176.00	19.50	176.00	19.50
186.00	14.60	186.00	19.70	186.00	19.70
196.00	14.80	196.00	19.70	196.00	19.70
206.00	14.80	206.00	19.90	206.00	19.90

c. Tablas de viscosidad del zumo de mango Kent

Viscosidad del zumo de mango Kent a 13.5°Brix

T°C	10	20	30	40	50	60
γ [1/s]	μ_{10} [Pa.s]	μ_{20} [Pa.s]	μ_{30} [Pa.s]	μ_{40} [Pa.s]	μ_{50} [Pa.s]	μ_{60} [Pa.s]
1	4.2500	4.1842	4.4845	3.9439	6.3126	4.5591
11.3	0.6319	0.6053	0.5690	0.5699	0.8673	0.6398
21.5	0.3684	0.3474	0.3144	0.3600	0.4930	0.3926
31.8	0.2670	0.2509	0.2198	0.2730	0.3491	0.2934
42.1	0.2152	0.2010	0.1720	0.2306	0.2779	0.2423
52.3	0.1849	0.1707	0.1484	0.2008	0.2352	0.2103
62.6	0.1613	0.1482	0.1327	0.1789	0.2029	0.1837
72.9	0.1454	0.1318	0.1180	0.1605	0.1797	0.1632
83.1	0.1336	0.1181	0.1066	0.1444	0.1613	0.1492
93.4	0.1242	0.1081	0.0975	0.1317	0.1478	0.1360
104	0.1154	0.0981	0.0898	0.1212	0.1346	0.1250
114	0.1070	0.0912	0.0834	0.1132	0.1254	0.1158
124	0.1008	0.0855	0.0780	0.1056	0.1161	0.1089
134	0.0963	0.0799	0.0734	0.1000	0.1090	0.1022
145	0.0903	0.0745	0.0688	0.0931	0.1021	0.0959
155	0.0858	0.0710	0.0652	0.0884	0.0961	0.0910
165	0.0824	0.0673	0.0624	0.0842	0.0921	0.0867
175	0.0783	0.0640	0.0589	0.0806	0.0869	0.0824
186	0.0753	0.0608	0.0565	0.0769	0.0833	0.0785
196	0.0724	0.0587	0.0541	0.0740	0.0796	0.0755
206	0.0699	0.0563	0.0515	0.0709	0.0762	0.0718

Viscosidad del zumo de mango Kent a 15.5°Brix

T°C	10	20	30	40	50	60
γ [1/s]	μ_{10} [Pa.s]	μ_{20} [Pa.s]	μ_{30} [Pa.s]	μ_{40} [Pa.s]	μ_{50} [Pa.s]	μ_{60} [Pa.s]
1	5.0500	4.9200	6.3400	5.6100	7.5876	7.0500
11.3	0.7106	0.6920	0.8301	0.7973	1.0442	0.9735
21.5	0.4242	0.4214	0.4698	0.4605	0.6047	0.5814
31.8	0.3097	0.3135	0.3333	0.3396	0.4497	0.4245
42.1	0.2470	0.2589	0.2637	0.2732	0.3682	0.3444
52.3	0.2122	0.2218	0.2237	0.2333	0.3136	0.2925
62.6	0.1853	0.1917	0.1949	0.2045	0.2764	0.2540
72.9	0.1660	0.1728	0.1742	0.1838	0.2483	0.2263
83.1	0.1516	0.1588	0.1576	0.1661	0.2262	0.2058
93.4	0.1403	0.1467	0.1435	0.1520	0.2056	0.1874
104	0.1308	0.1365	0.1298	0.1404	0.1894	0.1721
114	0.1228	0.1272	0.1202	0.1298	0.1754	0.1596
124	0.1153	0.1202	0.1121	0.1210	0.1629	0.1484
134	0.1090	0.1134	0.1052	0.1127	0.1530	0.1396
145	0.1021	0.1062	0.0986	0.1055	0.1434	0.1303
155	0.0974	0.1013	0.0929	0.0994	0.1355	0.1239
165	0.0921	0.0964	0.0885	0.0945	0.1267	0.1170
175	0.0880	0.0920	0.0835	0.0898	0.1183	0.1108
186	0.0839	0.0876	0.0801	0.0855	0.1113	0.1059
196	0.0801	0.0837	0.0770	0.0816	0.1061	0.1005
206	0.0772	0.0806	0.0733	0.0791	0.1015	0.0966

Viscosidad del zumo de mango Kent a 17.1°Brix

T°C	10	20	30	40	50	60
γ [1/s]	μ_{10} [Pa.s]	μ_{20} [Pa.s]	μ_{30} [Pa.s]	μ_{40} [Pa.s]	μ_{50} [Pa.s]	μ_{60} [Pa.s]
1	9.4500	5.3453	6.7700	5.2200	6.3664	6.1800
11.3	1.2743	0.7531	0.9469	0.7239	0.9027	0.9027
21.5	0.7302	0.4428	0.5395	0.4233	0.5256	0.5442
31.8	0.5252	0.3208	0.3836	0.3113	0.3836	0.4151
42.1	0.4133	0.2589	0.3040	0.2494	0.3088	0.3302
52.3	0.3442	0.2237	0.2562	0.2084	0.2620	0.2772
62.6	0.2939	0.1965	0.2252	0.1837	0.2284	0.2380
72.9	0.2593	0.1783	0.2016	0.1674	0.2016	0.2099
83.1	0.2323	0.1613	0.1817	0.1552	0.1805	0.1913
93.4	0.2109	0.1478	0.1649	0.1403	0.1638	0.1788
104	0.1923	0.1356	0.1500	0.1279	0.1500	0.1683
114	0.1781	0.1254	0.1386	0.1184	0.1386	0.1579
124	0.1661	0.1161	0.1282	0.1097	0.1282	0.1484
134	0.1560	0.1090	0.1201	0.1015	0.1194	0.1403
145	0.1455	0.1014	0.1124	0.0945	0.1117	0.1310
155	0.1368	0.0955	0.1058	0.0890	0.1058	0.1245
165	0.1303	0.0909	0.1006	0.0842	0.1000	0.1176
175	0.1240	0.0858	0.0954	0.0806	0.0954	0.1108
186	0.1177	0.0817	0.0903	0.0763	0.0909	0.1059
196	0.1133	0.0781	0.0872	0.0730	0.0867	0.1005
206	0.1034	0.0748	0.0830	0.0675	0.0835	0.0966

d. Tablas de energía de activación del zumo de mango Kent

Energía de activación del zumo de mango Kent a 13.5°Brix

1/T	0.003532	0.003411	0.003299	0.003193	0.003095	0.003002	μ_{ap0} (Pa.s)	Ea(KJ)
γ [1/s]	LN μ 10	LN μ 20	LN μ 30	LN μ 40	LN μ 50	LN μ 60		
1	1.447	1.431	1.501	1.372	1.843	1.517	16.292	3.249
11.3	-0.459	-0.502	-0.564	-0.562	-0.142	-0.447	1.698	2.492
21.5	-0.999	-1.057	-1.157	-1.022	-0.707	-0.935	1.356	3.279
31.8	-1.321	-1.383	-1.515	-1.298	-1.053	-1.226	1.142	3.657
42.1	-1.536	-1.605	-1.760	-1.467	-1.280	-1.418	1.079	4.054
52.3	-1.688	-1.768	-1.908	-1.606	-1.447	-1.559	0.967	4.162
62.6	-1.824	-1.909	-2.019	-1.721	-1.595	-1.694	0.840	4.136
72.9	-1.928	-2.026	-2.137	-1.829	-1.716	-1.813	0.702	3.969
83.1	-2.013	-2.137	-2.238	-1.935	-1.825	-1.902	0.618	3.901
93.4	-2.086	-2.224	-2.328	-2.027	-1.912	-1.995	0.516	3.663
104	-2.159	-2.322	-2.410	-2.111	-2.005	-2.079	0.456	3.566
114	-2.235	-2.394	-2.484	-2.179	-2.076	-2.156	0.427	3.581
124	-2.295	-2.459	-2.551	-2.248	-2.153	-2.218	0.382	3.469
134	-2.341	-2.528	-2.612	-2.303	-2.217	-2.280	0.339	3.319
145	-2.404	-2.597	-2.676	-2.374	-2.282	-2.345	0.317	3.318
155	-2.456	-2.646	-2.731	-2.426	-2.342	-2.397	0.291	3.235
165	-2.496	-2.699	-2.774	-2.474	-2.385	-2.446	0.275	3.202
175	-2.547	-2.749	-2.833	-2.519	-2.443	-2.496	0.259	3.189
186	-2.587	-2.801	-2.874	-2.565	-2.485	-2.545	0.243	3.140
196	-2.625	-2.836	-2.917	-2.604	-2.531	-2.583	0.227	3.067
206	-2.661	-2.877	-2.967	-2.647	-2.574	-2.633	0.204	2.907

Energía de activación del zumo de mango Kent a 15.5°Brix

1/T	0.003532	0.003411	0.003299	0.003193	0.003095	0.003002	$\mu_{ap0}(\text{Pa.s})$	Ea(KJ)
γ [1/s]	LN μ_{10}	LN μ_{20}	LN μ_{30}	LN μ_{40}	LN μ_{50}	LN μ_{60}		
1	1.619	1.593	1.847	1.725	2.027	1.953	72.865	6.372
11.3	-0.342	-0.368	-0.186	-0.226	0.043	-0.027	9.347	6.180
21.5	-0.858	-0.864	-0.756	-0.776	-0.503	-0.542	4.843	5.859
31.8	-1.172	-1.160	-1.099	-1.080	-0.799	-0.857	3.659	5.938
42.1	-1.398	-1.351	-1.333	-1.298	-0.999	-1.066	3.159	6.108
52.3	-1.550	-1.506	-1.497	-1.456	-1.160	-1.229	2.536	5.952
62.6	-1.686	-1.652	-1.635	-1.587	-1.286	-1.370	2.288	6.037
72.9	-1.796	-1.755	-1.747	-1.694	-1.393	-1.486	2.000	5.972
83.1	-1.886	-1.840	-1.847	-1.795	-1.486	-1.581	1.737	5.852
93.4	-1.964	-1.919	-1.942	-1.884	-1.582	-1.675	1.427	5.576
104	-2.034	-1.991	-2.042	-1.963	-1.664	-1.760	1.217	5.377
114	-2.097	-2.062	-2.119	-2.042	-1.740	-1.835	1.051	5.190
124	-2.160	-2.119	-2.188	-2.112	-1.815	-1.908	0.896	4.956
134	-2.217	-2.177	-2.252	-2.183	-1.877	-1.969	0.806	4.846
145	-2.282	-2.242	-2.316	-2.249	-1.942	-2.038	0.748	4.822
155	-2.329	-2.290	-2.376	-2.309	-1.999	-2.089	0.675	4.698
165	-2.385	-2.340	-2.425	-2.359	-2.066	-2.146	0.608	4.569
175	-2.430	-2.386	-2.483	-2.410	-2.135	-2.200	0.525	4.334
186	-2.478	-2.435	-2.524	-2.459	-2.196	-2.245	0.487	4.268
196	-2.524	-2.481	-2.563	-2.506	-2.243	-2.297	0.449	4.178
206	-2.562	-2.518	-2.613	-2.537	-2.288	-2.337	0.425	4.139

Energía de activación del zumo de mango Kent a 17.1°Brix

1/T	0.003532	0.003411	0.003299	0.003193	0.003095	0.003002	μ_{app} (Pa.s)	Ea(KJ)
γ [1/s]	LN μ 10	LN μ 20	LN μ 30	LN μ 40	LN μ 50	LN μ 60		
1	2.246	1.676	1.913	1.652	1.851	1.821	1.140	-4.416
11.3	0.242	-0.284	-0.055	-0.323	-0.102	-0.102	0.229	-3.502
21.5	-0.314	-0.815	-0.617	-0.860	-0.643	-0.608	0.165	-2.956
31.8	-0.644	-1.137	-0.958	-1.167	-0.958	-0.879	0.163	-2.191
42.1	-0.884	-1.351	-1.191	-1.389	-1.175	-1.108	0.137	-2.058
52.3	-1.067	-1.497	-1.362	-1.568	-1.340	-1.283	0.114	-2.099
62.6	-1.224	-1.627	-1.491	-1.694	-1.477	-1.435	0.101	-2.057
72.9	-1.350	-1.724	-1.601	-1.788	-1.601	-1.561	0.085	-2.186
83.1	-1.460	-1.825	-1.705	-1.863	-1.712	-1.654	0.084	-1.985
93.4	-1.556	-1.912	-1.803	-1.964	-1.809	-1.721	0.084	-1.754
104	-1.649	-1.998	-1.897	-2.057	-1.897	-1.782	0.087	-1.423
114	-1.726	-2.076	-1.976	-2.134	-1.976	-1.846	0.086	-1.286
124	-1.795	-2.153	-2.054	-2.210	-2.054	-1.908	0.082	-1.217
134	-1.858	-2.217	-2.119	-2.288	-2.125	-1.964	0.076	-1.227
145	-1.927	-2.289	-2.186	-2.359	-2.192	-2.032	0.072	-1.189
155	-1.989	-2.349	-2.246	-2.419	-2.246	-2.083	0.072	-1.030
165	-2.038	-2.398	-2.297	-2.474	-2.303	-2.141	0.065	-1.190
175	-2.087	-2.456	-2.349	-2.519	-2.349	-2.200	0.061	-1.202
186	-2.139	-2.504	-2.404	-2.573	-2.398	-2.245	0.060	-1.132
196	-2.178	-2.550	-2.439	-2.618	-2.445	-2.297	0.053	-1.308
206	-2.269	-2.594	-2.489	-2.696	-2.483	-2.337	0.062	-0.753

e. Clasificación taxonómica del mango Kent (*Mangifera indica* L.)



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA
MUSEO DE HISTORIA NATURAL



"Año de la Consolidación del Mar de Grau"

CONSTANCIA Nº 118-USM-2016

LA JEFA DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM) DEL MUSEO DE HISTORIA NATURAL, DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS, DEJA CONSTANCIA QUE:

La muestra vegetal (fruto), recibida de **Victor Andres NOVOA REVELO** y **Daril Giovanni MARTINEZ HILARIO**; Tesistas de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao, ha sido estudiada y clasificada como: ***Mangifera indica* L.**; y tiene la siguiente posición taxonómica, según el Sistema de Clasificación de Cronquist (1981):

DIVISION: MAGNOLIOPHYTA

CLASE: MAGNOLIOPSIDA

SUB CLASE: ROSIDAE

ORDEN: SAPINDALES

FAMILIA: ANACARDIACEAE

GENERO: *Mangifera*

ESPECIE: *Mangifera indica* L.

Nombre vulgar: "Mango Kent".
Determinado por: Blgo. Severo Baldeón.

Se extiende la presente constancia a solicitud de la parte interesada, para fines de estudios.

Fecha, 06 de junio de 2016



Haydeé Montoya Terreros
Dra. HAYDEE MONTOYA TERREROS
JEFA DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM)

DD8

f. Composición proximal

Full Report (All Nutrients): 45228179, FRUTA MANGO PULP, UPC: 041331092357		
Nutrient	Unit	Value per 100 g
Proximal		
Energy	kcal	60
Protein	g	2,06
Total lipid (fat)	g	0
Carbohydrate, by difference	g	8,25
Fiber, total dietary	g	0
Sugars, total	g	0
Minerals		
Calcium, Ca	mg	103
Iron, Fe	mg	0
Sodium, Na	mg	5
Vitamins		
Vitamin C, total ascorbic acid	mg	0
Vitamin A, IU	IU	819
Lipids		
Fatty acids, total saturated	g	0
Fatty acids, total trans	g	0
Cholesterol	mg	0

Adaptado de USDA Branded Food Products Database. Release July 2017

g. Nivel mínimo de grados Brix para zumo y/o puré de frutas

Nombre Botánico	Nombre común de la fruta	Nivel mínimo de grados Brix para zumo (jugo) de fruta reconstituido y puré reconstituido	Contenido mínimo de zumo (jugo) y/o puré (% v/v) en néctares de frutas
<i>Mammea americana</i>	Mamey	(°) ¹⁶	(°) ¹⁶
<i>Mangifera indica</i> L.	Mango	13.5	25.0
<i>Morus</i> sp.	Mora	(°) ¹⁶	30.0
<i>Musa species</i> incluidas <i>M. acuminata</i> y <i>M. paradisiaca</i> pero excluyendo los otros plátanos	Banano / Banano / Plátano	(°) ¹⁶	25.0
<i>Pawstifera edulis</i>	Granadilla amarilla	(°) ¹⁶	(°) ¹⁶
<i>Pawstifera edulis</i> Sims. f. <i>edulis</i> <i>Pawstifera edulis</i> Sims. f. <i>Flavicarpa</i> O. Def.	Granadilla	12 ¹⁷	25.0
<i>Pawstifera quadrangularis</i>	Granadilla	(°) ¹⁶	(°) ¹⁶
<i>Phoenix dactylifera</i> L.	Dátil	18.5	25.0
<i>Fruteria sapota</i>	Sapote	(°) ¹⁶	(°) ¹⁶
<i>Prunus armeniaca</i> L.	Albaricoque / Chabacano / Damasco	11.5	40.0
<i>Prunus avium</i> L.	Cereza dulce	20.0	25.0
<i>Prunus cerasus</i> L.	Cereza agria	14.0	25.0
<i>Prunus cerasus</i> L. cv. <i>Starcobae</i>	Guinda	17.0	25.0
<i>Prunus domestica</i> L. subsp. <i>domestica</i>	Ciruela	12.0	50.0
<i>Prunus domestica</i> L. subsp. <i>domestica</i>	Ciruela	18.5	25.0
<i>Prunus domestica</i> L. subsp. <i>domestica</i>	Ciruela claudia	12.0	25.0
<i>Prunus persica</i> (L.) Batsch var. <i>neopersica</i> (Suckow) c. K. Schind.	Nectarina	10.5	40.0
<i>Prunus persica</i> (L.) Batsch var. <i>persica</i>	Melocoton / Durazno	10.5	40.0
<i>Prunus spinosa</i> L.	Bruño	6.0	25.0
<i>Psidium guajava</i> L.	Guayaba	8.5	25.0
<i>Punica granatum</i> L.	Granada	12.0	25.0
<i>Pyrus arbutifolia</i> (L.) Poir.	Pera arbutiva	(°) ¹⁶	(°) ¹⁶
<i>Pyrus communis</i> L.	Pera	12.0	40.0
<i>Ribes nigrum</i> L.	Grosella negra	11.0	30.0
<i>Ribes rubrum</i> L.	Grosella roja	10.0	30.0
<i>Ribes rubrum</i> L.	Grosella blanca	10.0	30.0

Adaptado Norma General del Codex para Zumo y Néctares de Frutas