

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE
APURÍMAC**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL**



**DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LA
PULPA DE TUNA (*Opuntia ficus indica*) EN FUNCIÓN DE LA
TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AGROINDUSTRIAL

Bach. VICENTE PIMENTEL ZAVALA

Abancay, agosto del 2013

PERÚ



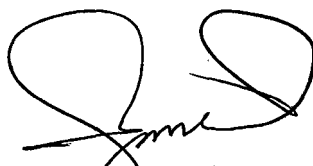
UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURIMAC	
CÓDIGO	MFN
T 1A E P 2013	BIBLIOTECA CENTRAL
FECHA DE INGRESO:	02 ENE. 2014
Nº DE INGRESO:	00349

**UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE
APURÍMAC**

FACULTAD DE INGENIERÍA

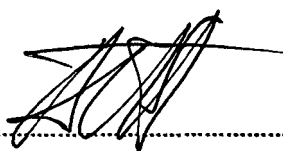
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

Jurado calificador:



.....
Presidente de jurado

Ing. M.C. Fulgencio Vilcanqui Pérez

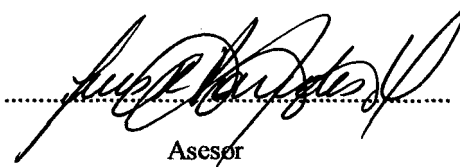


.....
Primer miembro de jurado

Ing. Alfredo Fernández Ayma

.....
Segundo miembro de jurado

Ing. Clarissa Loayza Serrano



.....
Asesor

Ing. Luis Ricardo Paredes Quiroz

DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE
LA PULPA DE TUNA (*Opuntia ficus indica*) EN FUNCIÓN DE
LA TEMPERATURA Y CONCENTRACIÓN



DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación, dedico a mi padre, que Dios la tiene presente con Él y a mi madre que tengo la dicha de tenerlo presente, a quien doy todo mi agradecimiento y a todos los que me apoyaron a culminar con esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS.

Agradezco de forma especial a mi alma mater, Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, por todos los conocimientos brindados.

A mi madre, a quien la admiro por su fortaleza, humildad y valores que me inculco, por estar presente día a día, y mi padre que Dios lo tiene halla de donde me guía y me cuida.

Al amigo, Ingeniero Reynaldo J. Silva Paz y el Ing. L. Ricardo Paredes Quiroz por sus conocimientos, orientación profesional y tiempo dedicado para el desarrollo de esta investigación.

A mis amigos y amigas que me brindaron su apoyo cuando los necesitaba y en los momentos más difíciles de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

	Pag.
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
1.1.1 Objetivo general	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
2 MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 TUNA.....	4
2.1.1 Clasificación de (<i>Opuntia ssp</i>)	5
2.1.2 Valor nutricional de la tuna.....	6
2.1.3 Propiedad de los cladodios.....	8
2.1.4 Propiedades funcionales de frutos.....	8
2.1.5 Características tecnológicas y procesos de transformación	9
2.1.6 Potencial de la utilización integral del nopal	11
2.1.7 Proceso de obtención de la pulpa de tuna	12
2.2 Concentración.....	16
2.3 Temperatura.....	17
2.4 Propiedades reológicas de los alimentos.....	17
2.5 Instrumentos de medición reológica en alimentos.....	18
2.5.1 Viscosímetros rotacionales.....	20
2.5.2 Viscosímetros de tubo.....	24
2.6 Definición de la reología.....	25
2.6.1 Definición de la viscosidad	26
2.6.2 Clasificación reológica de los Fluidos.....	26
2.6.3 Viscosidad Aparente.....	28
2.6.4 Variables que influyen sobre la consistencia de fluidos	35
3 MATERIALES Y MÉTODO	37
3.1 Lugar de Ejecución	37
3.2 Materiales y Equipos.....	37
3.2.1 Materia Prima.....	37
3.2.2 Equipos.....	37
3.3 METODOLOGÍA.....	38
3.3.1 Preparación de la muestra	38
3.3.2 Análisis Físicoquímico.....	39
3.4 MEDIDAS REOLÓGICAS	40
3.4.1 Diseño del experimento	40
3.4.2 Determinación experimental	41

3.4.3	Determinación de parámetros reológicos: Índice de Comportamiento de Flujo (n) y Coeficiente de Consistencia (k).....	42
3.4.4	Determinación del modelo o tipo de fluido reológico	43
3.4.5	Efecto de la temperatura sobre los parámetros reológicos.....	43
3.4.6	Efecto de la Concentración sobre los Parámetros Reológicos	44
3.4.7	Efecto combinado entre la temperatura y concentración.....	44
4	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	45
4.1	Análisis fisicoquímico.....	45
4.2	Determinación del comportamiento reológico de la pulpa de tuna	46
4.3	Efecto de la temperatura en el índice de consistencia.....	53
4.4	Efecto de la concentración sobre el índice de consistencia.....	56
4.5	Efecto combinado de la temperatura y concentración.....	58
5	CONCLUSIONES	63
6	RECOMENDACIONES	65
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
8	ANEXOS	69
	Anexo 1: Variación de la viscosidad frente a la velocidad de corte a 20°Brix	69
	Anexo 2: Reogramas de comportamiento reológico en función a la concentración.....	70
	Anexo 3: Determinación de análisis de varianza (ANOVA) para la evaluación de diferencia mínima significativa (LSD).....	71
	Anexo 4: Tipos de viscosímetros rotacionales.....	73
	Anexo 5: Ensayos oscilatorios de la pulpa de tuna.....	75
	Anexo 6: imágenes previas a la determinación reológica de la pulpa de tuna.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1. Composición química de la pulpa de tuna.....	7
Tabla 2. Características tecnológicas de la pulpa de tuna.....	10
Tabla 3. Instrumentos de medición en función a la consistencia de los alimentos.....	19
Tabla 4. Características y modelos matemáticos para fluidos independientes del tiempo ..	33
Tabla 5. Diseño experimental para la determinación reológica de la pulpa de tuna.....	40
Tabla 6. Resultado de composición fisicoquímica.....	45
Tabla 7. Resultado de parámetros reológicos.....	50
Tabla 8. Efecto de la temperatura sobre índice de consistencia y determinación de energía de activación.....	54
Tabla 9. Resultado del efecto de la concentración en índice de comportamiento.....	56
Tabla 10. Resultado de análisis de varianza (ANOVA) efecto de la temperatura y concentración en el índice de consistencia.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Viscosímetro de cilindros concéntricos.....	21
Figura 2. Viscosímetro de cono y plato.....	23
Figura 3. Viscosímetro de tubo.....	24
Figura 4. Esfuerzo de corte frente a la velocidad de corte para los fluidos.....	30
Figura 5. Fluidos no newtonianos independientes del tiempo.....	34
Figura 6. Diagrama de flujo para el análisis reológicos de la pulpa de tuna.....	39
Figura 7. Reograma de la pulpa de tuna a 10 °Brix.....	46
Figura 8. Reograma de la pulpa de tuna a 15 °Brix.....	47
Figura 9. Reograma de la pulpa de tuna a 20 °Brix.....	47
Figura 10. Reograma de la pulpa de tuna a 25 °Brix.....	48
Figura 11. Reograma de la pulpa de tuna a 30 °Brix.....	48
Figura 12. Reograma de comportamiento reologico en función a la concentración 10 °C...52	52
Figura 13. Reograma de comportamiento reologico en función a la concentración 40 °C...42	42
Figura 14. Efecto de la temperatura en índice de consistencia en pulpa de tuna.....	54
Figura 15. Efecto de la concentración en índice de consistencia.....	56
Figura 16. Superficie de respuesta del índice de consistencia en función a concentración y temperatura.....	60
Figura 17. Diagrama de contorno para la ecuación cuadrática del ajuste del índice consistencia.....	60
Figura 18. Diagrama de Pareto del efecto de las variables sobre el índice de consistencia...62	62
Figura 19. Índice de consistencia observada versus índice de consistencia predicha.....	62

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación para determinar el esfuerzo de corte frente al viscosímetro de cilindros concéntricos.....	21
Ecuación 2. Ecuación para determinar la velocidad de corte en viscosímetro de cilindros concéntricos.....	22
Ecuación 3. Ecuación para determinar la velocidad angular en viscosímetro de cilindros concéntricos.....	22
Ecuación 4. Ecuación para fluidos pseudoplásticos, velocidad angular.....	22
Ecuación 5. Ecuación de esfuerzo de corte para viscosímetro cono plato.....	24
Ecuación 6. Ecuación de velocidad de corte para viscosímetro cono plato.....	24
Ecuación 7. Ecuación de esfuerzo de corte para viscosímetro de tubo.....	25
Ecuación 8. Caudal volumétrico para viscosímetro de tubo.....	25
Ecuación 9. Caudal volumétrico para fluidos pseudoplasticos para viscosímetro de tubo.....	25
Ecuación 10. Ecuación de la viscosidad.....	26
Ecuación 11. Ecuación de fluidos newtonianos.....	27
Ecuación 12. Ecuación de viscosidad aparente.....	29
Ecuación 13. Ecuación de la ley de la potencia.....	31
Ecuación 14. Ecuación de la ley de la potencia linealizada.....	31
Ecuación 15. Ecuación de viscosidad aparente de los fluidos pseudoplasticos.....	31
Ecuación 16. Ecuación de plásticos de Bingham.....	31
Ecuación 17. Ecuación de Hershel Bulhley.....	32
Ecuación 18. Ecuación de Casson.....	32
Ecuación 19. Ecuación de Arhenius para el efecto de la temperatura.....	35
Ecuación 20. Ecuación de Arhenius linealizada para el efecto de la temperatura.....	36
Ecuación 21. Ecuación del modelo potencial para en efecto de la concentración.....	36
Ecuación 22. Ecuación del modelo exponencial para el efecto de la concentración.....	36
Ecuación 23. Ecuación de regresión múltiple lineal para el efecto combinado.....	36
Ecuación 24. Ecuación de regresión múltiple cuadrática para el efecto combinado.....	41
Ecuación 25. Ecuación para la determinación de la pendiente de la energía de activación.....	44

NOMENCLATURA

ω	Velocidad de giro [rad.s^{-1}]
T	Torque
δ	Espacio entre el cilindro giratorio y el recipiente contenedor de la muestra [m]
R_b	Radio del cilindro giratorio [m]
R_c	Radio del recipiente [m]
h	Altura [m]
θ	Angulo entre el cono y la muestra [rad]
Q_v	Caudal volumétrico [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]
τ	Esfuerzo de corte [Pa]
F	Fuerza [N],
A	Área [m^2]
γ	Velocidad de corte [s^{-1}]
μ_0	Viscosidad aparente [Pa.s]
k	Índice de consistencia [Pa.s^n]
n	Índice de comportamiento de flujo [s.u.]
τ_0	Esfuerzo de corte inicial o umbral de fluencia
K_0	Factor de frecuencia o constante de Arrhenius [Pa.s]
E_a	Energía de activación de flujo [kJ/mol]
R	Constante universal de los gases perfectos [8.314 J/g.mol.°K]
T	Temperatura absoluta [°K]
C	Contenido en sólidos solubles del fluido [°Brix]
ε	Error
R^2	Coeficiente de determinación
G'	Modulo de elasticidad
G''	Modulo de viscosidad

RESUMEN

Las propiedades reológicas de la pulpa de tuna (*Opuntia ficus indica*) variedad amarilla, fue estudiado entre las temperaturas de 10 °C a 70 °C y concentraciones de 10 °Brix a 30 °Brix. La obtención de la pulpa de tuna se realizó en los laboratorios de la Universidad Peruana Unión (Lima - Perú) utilizando una despulpadora, de mallas de abertura de 1,5 mm. Las medidas reológicas se obtuvieron con un viscosímetro rotacional Brookfield DV-III+ con software Rheocalc versión 3.2, los tratamientos se realizaron con un diseño en bloques completos al azar (DBCA) mediante un software Statgrafic plus 5.1 y Microsoft Excel 2010. El comportamiento reológico de la pulpa de tuna se ajustó adecuadamente a la Ley de la Potencia ($0,805 < R^2 < 0,966$) registrando un índice de consistencia entre $3,251 \text{ Pa.s}^n$ y $11,362 \text{ Pa.s}^n$, mientras que el índice de comportamiento al flujo entre $0,246 < n < 0,432$, encontrándose que la pulpa tiene un comportamiento pseudoplastico. La temperatura en la pulpa de tuna influye en cuanto respecta al índice de consistencia de tal modo que al incrementarse la temperatura el índice de consistencia (k) disminuye tornándose menos consistente, observándose una variación en la energía de activación de 6,345 kJ/mol y 12,532 kJ/mol. La concentración tiene influencia sobre la viscosidad, en cuanto se aumenta los sólidos solubles el índice de consistencia aumenta considerablemente, pero al aumentar la temperatura disminuye instantáneamente. El análisis de varianza (ANOVA) indica que existe un efecto significativo de la temperatura sobre el índice de consistencia, la que también indica que a menores temperaturas por debajo de 25 °C y concentraciones mayores a 20 °Brix el índice de consistencia y la viscosidad es más estable. Se encontró un modelo matemático que representa el efecto de concentración y temperatura sobre el índice de consistencia o viscosidad aparente ($R^2 = 0,92$).

ABSTRACT

The rheological properties of the tuna pulp (*Opuntia ficus indica*) yellow variety, was studied between the temperatures of 10 °C to 70 °C and concentrations of 10 °Brix to 30 °Brix. The obtaining of the tuna pulp was conducted in the laboratories of the Universidad Peruana Union (Lima - Peru) using a pulping machine, with a mesh of opening of 1,5 mm. Rheological measurements were obtained with a rotational viscometer Brookfield DV-III+ with Rheocalc software version 3,2, the treatments were done with a design in randomized complete block through (DBCA) a software Statgrafic plus 5,1 and Microsoft Excel 2010. The rheological behavior of the tuna pulp was adjusted properly to the Law of Power ($0,805 < R^2 < 0,966$) registering an index of consistency between 3,251 Pa.sⁿ and 11,362 Pa.sⁿ, while the rate of flow behavior between $0,246 < n < 0,432$, finding that the pulp has a pseudoplastic behavior. The temperature in the tuna pulp influences in terms of the index of consistency in such a way that with increasing temperature the consistency index (k) decreases becoming less consistent, observing a change in the activation energy of 6,345 kJ/mol and 12,532 kJ/mol. The concentration has influence on viscosity, as soon as the soluble solids increases the consistency rating increases considerably, but with the increased temperature decreases instantly. The analysis of variance (ANOVA) indicates that there is a significant effect of temperature on the rate of consistency, which also indicates that at lower temperatures below 25 °C and higher concentrations at 20 °Brix the consistency rating or apparent viscosity is more stable. Found a mathematical model that represents the effect of concentration and temperature on the rate of consistency or apparent viscosity ($R^2 = 0,92$).

1 INTRODUCCIÓN

La tuna (*Opuntia ficus indica*) es una fruta muy poco conocida y difundida en algunos países, mientras en Perú y México son bastante conocidos, donde se cultivan para fines comerciales, con amplio valor económico. Este fruto es oriundo del continente americano entre Perú – Bolivia, y de la meseta central de México, que se adecua perfectamente en diversos tipos de terrenos y climas desde el 0 msnm del mar hasta los 3000 msnm, entre las temperaturas de 12 a 30 °C en promedio. La tuna es una fruta de forma ovoide y pertenece a los frutos no climatérico (Abraján, 2008; Sáenz *et al.*, 2006).

La tendencia del consumo de alimentos, está relacionada con la demanda de frutas procesadas, debido a que el consumidor requiere alimentos confiables y saludables, existiendo un creciente interés por los productos orgánicos, exóticos y silvestres. Este fruto contiene vitaminas de 4,6 a 25 mg/100 g, calcio de 12,8 a 27,6 mg/100 g, proteínas de 0,21 a 1,60 mg/100 g y otros tipos de minerales que presenta la tuna respecto a otros frutos, siendo una ventaja para el consumidor. A partir de esta fruta se pueden obtener bebidas como rehidratantes, néctares, purés, helados, entre otros.

En el departamento de Apurímac la producción de tuna ha sido de 5 857 toneladas en el año 2011, la cual crece en forma silvestre y cultivada, siendo una menor parte utilizada para cercos de cultivos agrícolas y no ve como un generador de valor económico. El fruto en la actualidad es consumido en Apurímac de forma natural y algunas personas la procesan artesanalmente como es la mermelada (INEI, 2012).

Para la industria la pulpa debe estar apta para su transformación y debe cumplir con algunas características esenciales de calidad, características físicas, viscosidad o consistencia, por ello se considera importante tener una información científica más amplia sobre las características de la pulpa; con lo que su comportamiento reológico de la pulpa de

tuna es considerado como interesante para su caracterización en el desarrollo de nuevos productos.

La determinación de los parámetros reológicos de un fluido complejo es esencial en el proceso de elaboración de alimentos y bebidas en la industria alimentaria, en el control de calidad y caracterización de sus atributos texturales; así como también es importante conocer la energía necesaria para que el fluido alimentario fluya a través de un sistema de tuberías en una planta de transformación. Con el conocimiento de estos parámetros se pueden hacer cálculos para el diseño de equipos, bombas, intercambiadores de calor, evaporadores siendo lo más importante el transporte del fluido, relacionado con la aceptabilidad del producto (Alvarado, 1996)

En el presente trabajo de investigación se estudia las propiedades reológicas de la pulpa de tuna a diferentes concentraciones y distintas temperaturas que servirá como un aporte del conocimiento a la ciencia en el uso y manejo de datos para el procesamiento de la pulpa de tuna y el diseño de nuevos equipos para este mismo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

- Determinar las propiedades reológicas de la pulpa de tuna (*Opuntia ficus indica*) en función de la temperatura y concentración.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Determinar el tipo de fluido que presenta la pulpa de tuna (*Opuntia ficus indica*) variedad amarilla.
2. Evaluar el comportamiento reológico de la pulpa de tuna (*Opuntia ficus indica*) en función a diferentes temperaturas.
3. Conocer el comportamiento reológico de la pulpa de tuna (*Opuntia ficus indica*) a diferentes concentraciones.
4. Evaluar el comportamiento de las propiedades reológicas del efecto combinado entre la temperatura y la concentración en la pulpa de tuna (*Opuntia ficus indica*).

2 MARCO TEÓRICO

2.1 TUNA

Los nopales o tuna son plantas arbustivas que pueden alcanzar de 3 a 5 m de altura, crece en suelos arenosos, calcáreos, pedregosos y en tierras marginales y poco fértiles, sin embargo, los suelos altamente arcillosos y húmedos no son convenientes para su cultivo. (Abraján, 2008; Sáenz *et al.*, 2006).

En el mundo se conocen aproximadamente 300 especies, a partir de una complicada y controversial clasificación taxonómica; las características de las plantas que las hacen adaptables al medio árido tienen relación con la conformación de varios de sus órganos, sus raíces superficiales y extendidas captan el agua de las escasas lluvias que caen en esos ambientes, definiendo que la tuna pertenece a la familia *Cactaceae*, subgéneros *Opuntia* y *Nopalea* (Sáenz *et al.*, 2006).

Su identificación se dificulta por su alto nivel de hibridación. Son originarias del continente americano y se encuentran desde el norte de Canadá hasta el sur de Chile. Actualmente se han introducido en más de 30 países, donde se aprovechan en la producción de tuna, forraje y como sustrato en la cría de la cochinilla; transformándose en una planta cosmopolita. (Méndez y García, 2006).

Los tallos son suculentos y articulados, botánicamente llamados cladodios y vulgarmente pencas, poseen además espinas. En ellos se realiza la fotosíntesis, ya que los tallos modificados reemplazan a las hojas en esta función; se encuentran protegidos por una cutícula gruesa, que en ocasiones está cubierta de cera o pelos que disminuyen la pérdida de agua. Estos tallos presentan, además, gran capacidad para almacenar agua, ya que poseen abundante parénquima; en este tejido se almacenan considerables cantidades de agua lo que permite a las plantas soportar largos periodos de sequía. Chessa y Nieddu, (1997) y Ochoa (2003), citado por Sáenz *et al.* (2006), mencionan que el fruto es una falsa baya con ovario

ínfero simple y carnosos. La forma y tamaño de los frutos es variable; los hay ovoides, redondos, elípticos y oblongos, con los extremos aplanados, cóncavos o convexos. Los colores son diversos: hay frutos rojos, anaranjados, púrpuras, amarillos y verdes, con pulpas también de los mismos colores. La epidermis de los frutos es similar a la del cladodio, incluso con aréolas y abundantes gloquidios y espinas, que a diferencia del cladodio, persisten aún después de la sobre madurez del fruto. La cáscara de los frutos difiere mucho en grosor, siendo también variable la cantidad de pulpa. La tuna presenta numerosas semillas, que se consumen junto con la pulpa. Debido a que existen preferencias en algunos mercados por frutos con pocas semillas o sin semillas, el mejoramiento genético está orientado hacia la búsqueda y multiplicación de variedades que presenten esta característica (Sáenz *et al.*, 2006).

2.1.1 Clasificación de (*Opuntia ssp*)

Abraján (2008), la clasifica taxonómicamente el nopal en lo siguiente:

Reino	Vegetal
Subreino	<i>Embryophita</i>
Familia	<i>Cactaceae</i>
Subfamilia	<i>Opuntioideae</i>
Genero	<i>Opuntia</i>
Subgéneros de <i>Opuntia</i> .	5
Especies	300

Se conocen casi 300 especies del género *Opuntia*. Sin embargo, hay solo 10 o 12 especies hasta ahora utilizadas por el hombre, ya sea para producción de fruta y nopales para alimentación humana, forraje o cochinilla para obtención de colorante. Entre ellas se encuentran, como especies cultivadas para producción de fruta: *Opuntia ficus-indica*, *O. amyclaea*, *O. xocostle*, *O. megacantha* y *O. streptacantha*. Como especies silvestres:

Opuntia hyptiacantha, *O. leucotricha* y *O. robusta*. De las especies citadas, la más ampliamente cultivada en distintas partes del mundo es *Opuntia ficus-indica*, los frutos de esta son dulces, jugosos, de color amarillo, anaranjado, rojo o púrpura, con mucha pulpa y cáscara de grosor variable, pero generalmente delgada (Abraján, 2008; Sáenz *et al.*, 2006).

Sáenz *et al.* (2006), describe que algunas especies son ampliamente utilizadas para producción de fruta, por la calidad de la misma; es el caso de *Opuntia ficus-indica*, *O. hyptiacantha*, *O. megacantha* y *O. streptacantha*. Algunas de estas producen frutas de diversos colores, lo que constituye un atractivo adicional para los consumidores.

2.1.2 Valor nutricional de la tuna

Avalos (2009), describe que la tuna posee un valor nutritivo muy importante, contiene gran cantidad de: proteínas, carbohidratos, calcio, antioxidantes, fósforo y vitaminas como: complejo B, caroteno, niacina, tiamina, riboflavina y ácido ascórbico. Debido a estas propiedades la tuna disminuye el colesterol, debido a que la fibra que contiene retarda su absorción. También reduce las concentraciones de triglicéridos; disminuye los niveles de azúcar en la sangre ayudando a controlar procesos como la diabetes y la hiperglucemia. Sirve, además, para la prevención de la osteoporosis, gracias al calcio y fósforo que contiene, y se recomienda contra las úlceras, porque reduce la producción de ácido gástrico. Pero de todas las facultades, una de las más destacadas es el poder antioxidante que puede contribuir a la detención del cáncer.

Tabla 1. Composición química de la pulpa de tuna (g/100g pulpa)

Composición	Intervalo
Humedad	83,8 - 91,0
Proteínas	0,21 - 1,60
Grasa	0,09 - 0,70
Fibra	0,02 - 3,16
Cenizas	0,40 - 0,51
Azucares totales	8,10 - 14,11
Calcio (mg/100g)*	12,8 - 27,6
Fósforo (mg/100g)*	15,4 - 32,8
Potasio (mg/100g)*	78,72 - 220
Magnesio (mg/100g)*	16,1 - 98,4
°Brix*	12,0 - 15,41
Vitamina C (mg/100g)*	4,60 - 25,00
pH*	5,80 - 7,10

Fuente: Abraján (2008); * Sáenz *et al.*, (2006).

La composición de la tuna varía con la madurez. Es necesario tener en cuenta que son frutos «no climatéricos» (no maduran una vez cosechados), por lo que es importante cosecharlos en el punto de madurez óptima de consumo, donde está mejor expresado su potencial nutricional y propiedades.

Los sólidos solubles totales aumentan rápidamente cuando la pulpa comienza a crecer (40-50 días después del cuajado de la flor); cuando se inicia el cambio de color de la cáscara, el contenido de sólidos es de 85 a 90 por ciento del que alcanza un fruto maduro. Cuando el color de la cáscara ha llegado a la mitad de lo que alcanzaría en la madurez completa, el contenido de sólidos solubles totales llega a valores de 12-15 por ciento, dependiendo del cultivar, es en esta etapa cuando se alcanza la mejor calidad de fruta para consumo en fresco o para almacenamiento. Los sólidos solubles totales aumentan ligeramente en frutos completamente maduros, pero en esta etapa ya no son adecuados para almacenamiento y están muy blandos para el manejo.

2.1.3 Propiedad de los cladodios

Los cladodios, por su parte tienen interés desde el punto de vista industrial ya que cuando los brotes son tiernos (10-15 cm) se usan para la producción de nopalitos, y cuando están parcialmente lignificados (cladodios de 2-3 años), para la producción de harinas y otros productos.

Sáenz *et al.* (2006), cita a Flores *et al.* (1995), que en un estudio efectuado en 20 variedades de nopal y analizando tallos (suberificados), cladodios maduros (penca anual) y cladodios jóvenes (brotes), concluyen al igual que Pimienta (1990), que el contenido de proteínas es mayor en los brotes; la fibra cruda aumenta con la edad del cladodio, llegando a 16,1 % en los tallos suberificados, pero siendo cercana a 8,0 %, en promedio, en los brotes. El contenido de cenizas no sigue la misma tendencia, ya que en este último trabajo, los brotes o renuevos presentan un contenido menor de cenizas que los tallos y pencas; dicha variación se debería a la serie de compuestos y elementos que conforman la ceniza y a la estrecha relación de estos con la química de suelos y a los complejos fenómenos de la disponibilidad de sus elementos para la planta. Sáenz *et al.*, (2006) indican que la composición química de los nopalitos frescos es principalmente agua (91 por ciento) y 1,5 % de proteínas; 0,2 % de lípidos; 4,5 % de hidratos de carbono totales; 1,3 % de cenizas, de la cual 90 % es calcio; además, contiene 11 mg/100 g de vitamina C y 30 µg/100 g de carotenoides; el contenido de fibra (1,1 %) la hace comparable a la espinaca.

2.1.4 Propiedades funcionales de frutos

Los compuestos funcionales son aquellos que tienen efectos beneficiosos para la salud y tanto los frutos como los cladodios de la tuna presentan componentes, entre los que destacan la fibra, los hidrocoloides (mucílagos), los pigmentos (betalainas y carotenoides), los minerales (calcio, potasio), y algunas vitaminas como la vitamina C, buscada entre otros

motivos, por sus propiedades antioxidantes; todos estos compuestos son muy apreciados desde el punto de vista de una dieta saludable y también como ingredientes para el diseño de nuevos alimentos (Sáenz *et al.*, 2006).

La pulpa de la fruta es la parte más rica en vitamina C mientras que los cladodios son más ricos en fibra. Los pigmentos solo se encuentran en los frutos y tanto las betalainas como los carotenoides pueden estar presentes en la cáscara y en la pulpa de los diversos ecotipos y variedades, según Sloan (2000) citado por Sáenz *et al.* (2006), señalan que estos compuestos forman parte de los alimentos que se conocen como alimentos funcionales, los cuales se definen como «un alimento o bebida que proporciona un beneficio fisiológico, que fortalece la salud, ayuda a prevenir o trata enfermedades, o mejora el rendimiento físico o mental por la adición de un ingrediente funcional, por la modificación de un proceso o por el uso de la biotecnología.

La tuna, cuando se consume con las semillas, que es el modo corriente de consumo en fresco, aporta una interesante cantidad de fibra. Muñoz de Chávez *et al.* (1995), citado por Sáenz *et al.*, (2006), informan sobre cantidades variables, dependiendo de la especie, con rangos entre 2,73 mg/100g para *Opuntia streptacantha* a 11,38mg/100g para *O. ficus-indica*.

2.1.5 Características tecnológicas y procesos de transformación

Además de la composición química y el valor nutritivo de la tuna, hay otras características que tienen una importante función durante el procesamiento; en este sentido la tuna presenta un desafío interesante. El alto valor de pH (5,3 - 7,1) de la mayoría de los nopales, salvo *Opuntia xocostleque* que presenta un pH menor a 3,5; Mayorga *et al.* (1990), clasifica al fruto dentro del grupo de baja acidez (pH > 4,5); esto requiere un tratamiento térmico a por lo menos de 115,5 °C, para lograr un buen control de microorganismos. El alto valor de pH y el alto contenido de sólidos solubles hacen que la pulpa de tuna sea un medio propicio para el



desarrollo de microorganismos, descrito por Sepúlveda y Sáenz, (1990); Sáenz, (1999) citada por Sáenz *et al.*, (2006).

Las pectinas, aunque están presentes en la pulpa en baja cantidad, son parcialmente responsables de la viscosidad de la misma y son un elemento positivo en la producción de jugos y jaleas. (Sáenz *et al.*, (2006).

La existencia de tunas de diversos colores amplía las posibilidades de industrialización de esta especie; en la tabla 2 se pueden comparar las características tecnológicas de tres ecotipos de tuna de diversos colores cultivados en nuestro departamento de Apurímac.

Tabla 2. Características tecnológicas de la pulpa de tuna (g/100g)

Parámetro	Tuna verde	Tuna púrpura	Tuna amarilla
Pulpa y semilla	49,60	37,90	59,30
Cáscara	50,40	62,10	40,70
pH	6,37	5,85	6,10
Acidez (% ácido cítrico)	0,06	0,04	0,043
°Brix (SST)	14,06	14,50	14,80
Pectina	0,17		0,04
Viscosidad (mPa s)	73,90	119,20	45,00

Fuente: Sáenz *et al.*, (2006).

Sáenz *et al.* (2006), manifiesta que, el color de la fruta es debido a la presencia de pigmentos carotenoides y betalainas en frutos anaranjados y púrpuras, respectivamente, es sin duda un parámetro importante por su atractivo, tanto en los frutos, como en los productos derivados de ellos. Sáenz y Sepúlveda (2001), informan que el color de los jugos de tuna verde se altera fácilmente al degradarse la clorofila, efecto que se ve acentuado con la adición de ácido, operación que se realiza con el fin de asegurar la estabilidad microbiológica del producto. En el caso de los jugos de tuna púrpura, este efecto se ve minimizado, ya que las betalainas, superan en estabilidad a las clorofilas, frente a similares tratamientos térmicos o variaciones de pH.

Según Sáenz *et al.* (2006), describe que la viscosidad que poseen las pulpas se ve influida por la presencia de pectinas y mucílagos. Ambos compuestos están considerados dentro del grupo de los hidrocoloides por su gran capacidad para captar y retener agua; forman parte, a su vez, de la fibra dietética. Estos compuestos, pueden ser utilizados como espesantes en productos alimenticios.

2.1.6 Potencial de la utilización integral del nopal

Tal como se ha señalado, los nopales son dignos de ser considerados para la industrialización no solo por sus frutos y cladodios. Del mismo modo que cualquier otro vegetal utilizado para consumo humano, la tuna y los cladodios se conservan y transforman aplicando tecnologías equivalentes de procesamiento, y existen alimentos tradicionales preparados en base a tuna y nopalitos. Se cuentan entre ellos alimentos en base al fruto como las mermeladas, jugos y néctares; productos deshidratados; jugos concentrados, jarabes y licores. En base a los cladodios se encuentran, encurtidos, jugos, mermeladas y productos mínimamente procesados (Sáenz y Sepúlveda, 2001).

Además existen en estas plantas valiosos y atractivos compuestos funcionales que pueden ser extraídos y utilizados para formular y enriquecer nuevos alimentos, para formar parte de la cada vez más cotizada gama de aditivos naturales (gomas, colorantes) tanto para la industria alimentaria como farmacéutica y cosmética, para formular suplementos alimenticios, ricos en fibra o con fines de control de la diabetes o la obesidad, entre otros (Sáenz *et al.*, 2006).

Por otra parte, es importante la utilización indirecta de la planta como hospedero de la cochinilla del carmín para producir colorantes naturales.

Sin duda, la posibilidad de utilización integral de esta especie es de especial atractivo e interés para el sector agroindustrial, ya que toda industria busca obtener el máximo provecho de sus materias primas. Es una forma específica de aumentar la rentabilidad de la empresa y

además se evita la eliminación de desechos. Estos, al ser producidos, pasan no solo a formar parte de las pérdidas de los procesos, influyendo directamente en la rentabilidad de los mismos, sino que además, si no son tratados oportuna y adecuadamente, pueden contaminar el entorno como residuos líquidos o sólidos, provocando en ocasiones danos ambientales irreversibles (Sáenz *et al.*, 2006).

Existen amplias posibilidades de utilización de las diversas partes de la planta, así como la existencia de diferentes especies de nopales que proporcionan frutos de diversos colores y cladodios con diversas utilidades dependiendo de su madurez (aptos tanto para el consumo humano y para alimentación animal). La posibilidad alternativa, de producción de cochinilla en las pencas y la potencial obtención de una variada gama de compuestos funcionales para la industria de suplementos alimenticios y de cosméticos es una ventaja de los nopales frente a otros vegetales ya que se pueden destinar al sector agroindustrial o pueden entrar a formar parte de la dieta humana (Sáenz *et al.*, 2006).

2.1.7 Proceso de obtención de la pulpa de tuna

Cosecha

La cosecha se realiza en función al grado de madurez de la fruta; los cambios fisiológicos y químicos de la tuna indican su estado de madurez y se manifiestan en los cambios de color, sabor y textura.

Para el caso de consumo directo y procesamiento la fruta se cosecha completamente maduros ya que estas pertenecen a las frutas no climatéricas, una vez cosechadas ya no llegan a madurar.

Recepción

Con la recepción se asegura un abastecimiento continuo de la materia prima para su procesamiento en la industria, debe planificarse para permitir una continuidad en su

funcionamiento, además se recomienda realizar una selección y localización según su procedencia, para evaluar al mejor proveedor en función de la calidad de la fruta recibida.

Selección de la materia prima

La selección consiste en separar la materia prima en función del grado de madures, sanos y aptos para ser procesados, deben de estar firmes, libre de picaduras de insectos o aves y sin podredumbre. Este es uno de los puntos más críticos del proceso ya que para obtener un producto de buena calidad se debe partir de materia prima sana libre de contaminantes.

Pesado

Esto debe realizarse al recibir la materia prima, antes de formular y al finalizar el proceso. Registrar todo los pesos usando una balanza de plataforma o de reloj.

Lavado

Debe realizarse con abundante agua y en algunos casos puede aplicase soluciones de desinfectantes como el cloro y entre otros.

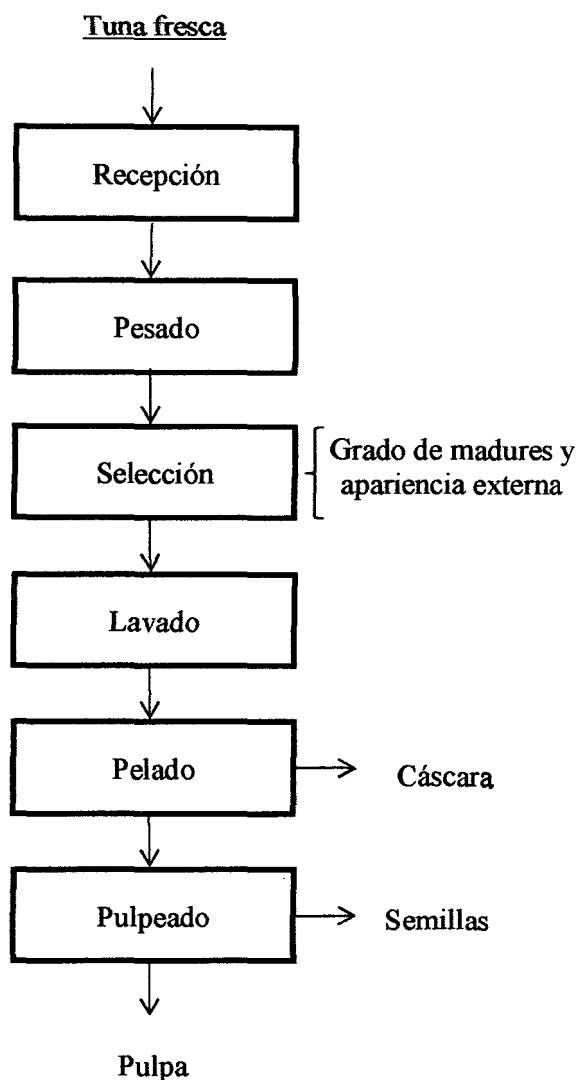
Pelado

Mediante el pelado se elimina la cascara de la fruta, actualmente solo se conoce el pelado manual para la tuna, otras técnicas no han sido todavía especificados por ningún autor.

Pulpeado

Es un proceso mecánico que se realiza para separar las semillas de la pulpa, donde la calidad de esta dependerá del tamaño del tamiz del despulpador, se pueden utilizar pulpeadores con dos calibres de mallas una gruesa y otra fina de acuerdo a la calidad de pulpa y del producto a obtenerse.

Flujograma de obtención de la pulpa de tuna



Fuente: Solid Perú, 2008

Se denomina pulpa de fruta u hortaliza el producto resultante de dividir finamente y, si es necesario, de tamizar la parte comestible de las frutas u hortalizas a diferencia del jugo, que consiste en el producto líquido obtenido al exprimir la fruta u hortaliza sin diluir, concentrar ni fermentar. Por las características estructurales y la composición química de ciertas frutas y hortalizas, de algunas sólo es posible obtener jugo (Cítricos, melón, sandía) y de otras únicamente pulpas (guanábana, guayaba, plátano), pero de la gran mayoría puede obtenerse jugo o pulpa dependiendo del método de extracción utilizado (como en el caso de

la manzana, pera, durazno, tuna, zanahoria y betabel). El despulpado o extracción de pulpa se consigue por diversos métodos:

a) Las frutas se pasan por un despulpador, el cual se compone de un tamiz cilíndrico inclinado con perforaciones de determinado tamaño (0.8-2 mm), que posee en su interior paletas y/o cepillos rotatorios que presionan la fruta contra el tamiz, logrando que la pulpa pase a través de los orificios de éste y eliminando por la parte central del equipo las semillas o huesos, cáscaras, material muy fibroso, etcétera.

Dependiendo de cada caso, la fruta puede introducirse al despulpador entera con piel, semillas o hueso, ya sea sin escaldar, como el mango, o previamente escaldada, como la manzana y la guayaba (el escaldado aquí tiene la doble función de ablandar la fruta para aumentar la eficiencia del despulpado y evitar el oscurecimiento de la pulpa), o bien pelada, cortada con o sin semillas, por ejemplo, la manzana de piel roja, la guanábana, tuna y la papaya (para evitar que la piel y/o semillas se incorporen a la pulpa y proporcionen a ésta un sabor o aspecto desagradable).

b) Otro sistema para obtener pulpa es mediante desmenuzadores.

Existe una gran cantidad de diseños y equipos en los que puede llevarse a cabo esta operación, y su selección depende de las características de la materia prima por desintegrar.

Algunos de los sistemas más comunes incluyen lo siguiente:

1. Desintegrador tipo *Rietz*, que consta de martillos y/o cuchillas giratorias rodeados de una malla perforada por la que se obliga a pasar al producto mediante su corte y golpeteo.
2. Molino de martillos, que opera de manera similar al anterior, pero únicamente con martillos.
3. Extractor helicoidal, que consta de un tornillo helicoidal rodeado de un tamiz cónico (sin punta), cuyo diámetro mayor se encuentra cerca de la alimentación y se va reduciendo conforme el material es obligado a circular a través del tornillo. El movimiento de este

último desmenuza el producto y, en la parte final, lo empuja contra la malla obligándolo a pasar a través de ella.

Mediante estos sistemas pueden obtenerse pulpas de hortalizas como la zanahoria y el chícharo (precosidas), o de frutas muy firmes como la pulpa de coco.

La pulpa obtenida ya sea por despulpado o desmenuzado normalmente posee partículas gruesas y fibra, las cuales deben reducirse de tamaño o eliminarse y para ello se practica, por lo general, un refinado de la pulpa.

El sistema más empleado para la refinación de la pulpa se basa en someterla a un "refinador", cuyo principio es similar al del despulpador, pero su tamaño es más pequeño y los tamices poseen orificios mucho menores (0.5 mm o menos).

Si se requiere un tamaño de partícula aún menor que el obtenido por el refinado, conviene utilizar un molino coloidal, que consta de un disco que gira a altísima velocidad (3000-15000 rpm) sobre otro disco estacionario, con una separación muy pequeña entre ambos (1.3-0.05 mm), obligando al material a pasar a través de ellos. Este sistema resulta apropiado también para la homogeneización de fluidos (como néctares, pastas, etc.) (app.ute.edu.ec, 2013).

2.2 Concentración

El término es usado para hacer referencia al proceso de concentración, aumentar la proporción de soluto en el disolvente, inverso al de dilución. Los grados Brix ($^{\circ}\text{Bx}$) sirven para determinar el cociente total de sacarosa disuelta en un líquido. Una solución de 25 $^{\circ}\text{Bx}$ contiene 25 g de azúcar (sacarosa) por 100 g de líquido. Dicho de otro modo, en 100 g de solución hay 25 g de sacarosa y 75 g de agua (Alcázar, 2004).

Dichas concentraciones se pueden realizar la medición por un refractómetro, que consiste en un tubo con una prisma en su interior que dirige los rayos de la luz incidente hacia a una escala observable en un ocular de una muestra colocada en la prisma, esta al

serrarse ocasiona una desviación proporcional a la cantidad de solidos disueltos, esta desviación es leída en escala como porcentaje de azúcares o denominado también concentración de la solución expresado en grados Brix (Alcázar, 2004).

2.3 Temperatura

La temperatura es una magnitud física que refleja la cantidad de calor, ya sea de un cuerpo, de un objeto o del ambiente. La temperatura de un cuerpo indica en qué dirección se desplazará el calor al poner en contacto dos cuerpos que se encuentran a temperaturas distintas, ya que éste pasa siempre del cuerpo cuya temperatura es superior al que tiene la temperatura más baja; el proceso continúa hasta que las temperaturas de ambos se igualan. Dicha magnitud está vinculada a la noción de frío (menor temperatura) y caliente (mayor temperatura) (Potter, 2004).

2.4 Propiedades reológicas de los alimentos

Para el estudio del comportamiento reológico de los diferentes alimentos, es necesario recurrir a la reometría, lo que permite conocer dicho comportamiento, y ser utilizado en distintos campos de la industria (Ibarz, 2005).

Según McCabe, (1991); Paúl Singh, (1998); Hermida, (2000), el comportamiento de los fluidos es importante en los procesos de ingeniería en general y constituye uno de los fundamentos para el estudio de las operaciones unitarias. El conocimiento de los fluidos es esencial, no solamente para tratar con exactitud los problemas de movimiento de fluidos a través de tuberías, bombas y otros tipos de aparatos, sino también para el estudio del flujo de calor y de muchas operaciones de separación que dependen de la difusión y la transferencia de materia. Son básicas en la ingeniería de procesos para el diseño de plantas para establecer las dimensiones de tuberías y válvulas, para realizar mezclas, además se utilizan para el

cálculo de operaciones con transferencia de calor, masa y cantidad de movimiento (Alvarado, 1996).

El comportamiento de un fluido depende mucho del fluido si éste está o no bajo la influencia de superficies sólidas. En la región donde la influencia de la pared es pequeña el esfuerzo cortante puede ser despreciable, y el comportamiento del fluido se acerca al de un fluido ideal, es decir, no compresible y con viscosidad cero. El flujo de un fluido ideal recibe el nombre de flujo potencial y está completamente descrito por la mecánica newtoniana y la conservación de la materia (McCabe, 1991).

Según Aguado *et al.* (1999), describe que la mayor parte de las operaciones básicas de la Industria Alimentaria tanto de conservación como de procesamiento de alimentos, conlleva el manejo de fluidos en movimiento que llega a ser operaciones esenciales en los procesos. Las pérdidas de energía que se producen en un sistema de flujo por rozamiento entre los fluidos y las superficies sólidas de contacto dependen directamente de su consistencia, por ello el diseño de las operaciones desarrollan el flujo de fluidos y de los correspondientes equipos requeridos por la consistencia de dichos fluidos.

2.5 Instrumentos de medición reológica en alimentos

Los aparatos que se utilizan para determinar experimentalmente las propiedades reológicas de los fluidos se denominan viscosímetros (Aguado, 1999), se puede clasificar en dos categorías: el de tipo rotacional y el de tipo tubular, los métodos fundamentales pueden clasificarse según el tipo de fluido a medir, que pueden ser de tubos capilares, cilindros concéntricos, plato y cono, platos paralelos, flujo por compresión (Alvarado, 1996; Ibarz, 2005). En la Tabla 3 Se muestran los instrumentos de medición según la consistencia de los alimentos

Tabla 3. Instrumentos de medición en función de la consistencia de los alimentos

Consistencia	Instrumentos de medición de las características físicas reológicas	Instrumental de medición de los valores característicos
Alimentos fluidos “alimentos newtonianos”	Viscosímetro capilar Viscosímetro de rotación con - cilindro coaxial - cono y placa Viscosímetro de caída de bola Viscosímetro de vibración	Viscosímetro con sonda rotativa Amilógrafo Contador de caída Viscosímetro de descarga
“Alimentos no newtonianos”	Viscosímetro de rotación con cilindro coaxial Viscosímetro de rotación de cono y placa Viscosímetro capilar a presión Viscosímetro de barra de bolas	Como en el caso de fluidos newtonianos
“Alimentos viscoelásticos”	Viscosímetro de rotación especial, coaxial para tolerancia a la fluencia, relajación al atenuación y propiedades reológicas dinámicas Viscosímetro de cono y placa de montaje simple o con dispositivo de cizalla por oscilación	Amasadora agitadora
Alimentos semisólidos. Alimentos pastosos y plásticos	Viscosímetro capilar de alta presión Medidor de tracción y dilatante Consistómetro	Penetrometro Amasadora Agitador Extensómetro hesiometro
Alimentos solidos	Medidor de resistencia a la tracción Medidor de resistencia a la presión Medidor de resistencia a la flexión Medidor de resistencia al cizallamiento Medidor de dureza	Penetrómetro de aguja, espiga, cono y esfera Panmetro de esfuerzos por presión placa-placa Prensa de extrusión

Fuente: Horst (2001).

2.5.1 Viscosímetros rotacionales

Los viscosímetros rotacionales son muy útiles en un amplio intervalo de medición de viscosidad y particularmente valiosos para el estudio de sistemas no newtonianos, estos instrumentos operan por medio de la rotación de un cilindro o disco (husillo) permiten medidas continuas a una velocidad de deformación o esfuerzo cortante dados para periodos de tiempos prolongados, inmerso en un líquido, experimenta un arrastre viscoso midiendo la resistencia de esta substancia a una velocidad de rotación seleccionada. La resistencia resultante o par es la medida del flujo de viscosidad, dependiendo de la velocidad y de las características del husillo; el instrumento calcula el par y la lectura directa de la viscosidad la que queda reflejada en cP (CGS) o mPa-s (SI) (Alvarado, 1996; Ibarz, 2005).

Dependiendo de la geometría se distinguen los diferentes tipos de viscosímetros rotacionales: cilindros concéntricos, plato y cono y platos paralelos los más comunes que se utilizan se detallan a continuación.

2.5.1.1 Tipos de viscosímetros rotacionales

Existen dos tipos de viscosímetros rotacionales: viscosímetro rotacional donde se Controla el Esfuerzo de corte (Controlled Stress - CS), Figura A (Anexo 4) y Viscosímetros rotacionales donde se controla la velocidad de corte (Controlled Rate – CR), donde a su vez encontramos dos variantes en los viscosímetros CR, donde en uno se controla el movimiento de rotor Figura B₁ (Anexo 4) y en otro se controla el movimiento de la geometría o spindle - huesillo Figura B₂ (Anexo 4).

2.5.1.2 Viscosímetro de cilindros concéntricos

Este viscosímetro rotacional pueden utilizar vasos adicionales y rotores en forma de esferas, discos, conos y otras forma, el de tipo más común es el de cilindro coaxial mostrado en la Figura 1 donde que el cilindro interior de radio R_b gira a una velocidad definida y

fuerza al fluir a la muestra que se encuentra contenida en el espacio δ en el recipiente de radio R_c , que generalmente permanece estacionario; para determinar la viscosidad se aplica una torsión T con una velocidad angular ω resultante de una torsión dada sobre la fuerza de líquido que por cortar transmite un torque relacionada con la velocidad sobre el cilindro interno el cual será detectado por un sensor de torque adherido a esta; el líquido cubre el cilindro interno hasta una altura h (Ibarz, 2005; Sharma *et al.*, 2003).

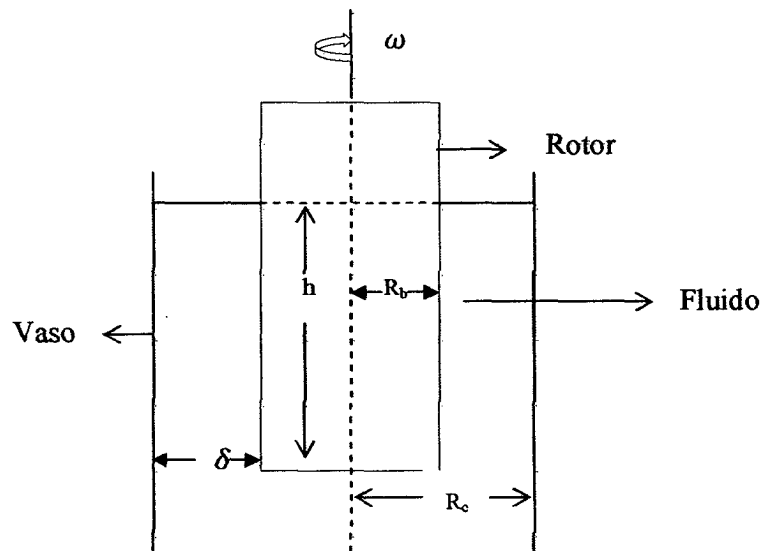


Figura 1. Viscosímetro de cilindros concéntricos

La velocidad de rotación que se aplica no se puede considerar lineal, por lo que el esfuerzo de corte varía en cada medida, de un punto a otro a lo largo de la coordenada radial, la velocidad viene determinada por el comportamiento reológico del fluido y la ecuaciones que se describen a continuación.

La ecuación que presenta para fluidos newtonianos, para un valor dado de la coordenada radial se cumple:

$$\tau = \frac{T}{2 \pi R_b^2 h} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{\omega R_b}{\delta} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{T}{4\pi\mu h} \left[\frac{1}{R_b^2} - \frac{1}{R_c^2} \right] \quad (3)$$

De acuerdo con la ecuación, la representación gráfica $\omega - T$ para un fluido newtoniano ha de ser una línea recta que pasa por el origen de las coordenadas cuya pendiente es la viscosidad del fluido.

Para fluidos pseudoplásticos se obtiene la ecuación sustituyendo la ley de la viscosidad de Newton por la ley de la potencia:

$$\omega = \frac{n}{2 k^{1/n}} \left(\frac{T}{2 \pi h} \right)^{1/n} \left[\frac{1}{R_b^{2/n}} - \frac{1}{R_c^{2/n}} \right] \quad (4)$$

La ecuación es linealizable tomando logaritmos en ambos miembros, de forma que la ordenada en el origen y la pendiente de la representación gráfica $\ln\omega - \ln T$ se puede obtener los parámetros reológicos índice de consistencia (k) e índice de comportamiento (n) (Ibarz, 2005).

• Viscosímetro Brookfield

Esta es un equipo de tipo de viscosímetros rotacionales o cilindros coaxiales, el funcionamiento de un viscosímetro rotacional se basa en la resistencia a la torsión que ofrece un líquido al giro de un splindle - husillo de características conocidas, sumergido en el líquido.

El cilindro concéntrico (splindle - husillo), está acoplado con un muelle al árbol del motor que gira a una velocidad determinada. El ángulo de desviación del eje se mide electrónicamente dando la medida de torsión.

Los cálculos realizados dentro de los viscosímetros a partir de las medidas de la fuerza de torsión de la velocidad del eje y de sus características, dan una lectura directa de la viscosidad (mPa.s).

Los viscosímetros disponen de una serie de varios tipos de husillos y de una extensa gama de velocidades proporcionando así una gran capacidad de medida de la viscosidad para cualquier líquido de viscosidad determinada, la resistencia al avance aumenta proporcionalmente a la velocidad de rotación del husillo o al tamaño del mismo (Quality Control Instruments, 2001).

2.5.1.3 Viscosímetro de plato y cono

Consta de un cono que gira sobre una placa plana estacionaria, en la Figura 2 se muestran los detalles de este viscosímetro:

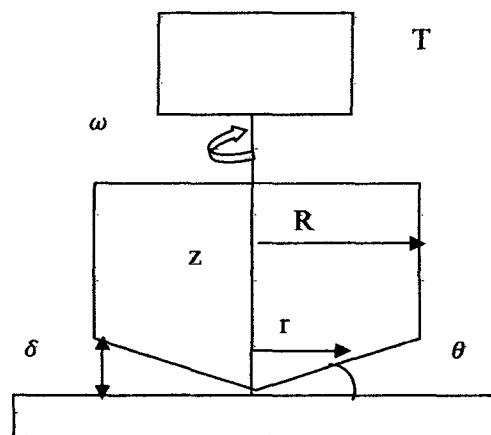


Figura 2. Viscosímetro de plato y cono

De la figura: T torque del motor, ω velocidad de giro, δ espacio que ocupa la muestra, R y r son radios de cono y θ ángulo entre el cono y la placa plana (Aguado, 1999).

De modo que θ sea inferior a 5° lo que permite que el perfil de velocidad lineal y la velocidad de corte es constante en cada medida

La ecuación que se utiliza para determinar el esfuerzo de corte y la velocidad de corte es:

$$\tau = \frac{3 T}{2 \pi R^3} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{\omega r}{r \operatorname{tg} \theta} \quad (6)$$

2.5.2 Viscosímetros de tubo

El fluido en estudio se hace circular por el interior de un tubo cilindro por gravedad o aplicando presión a la entrada (Figura 3), el ensayo consiste en la realización de diferentes medidas variando el caudal volumétrico del fluido y registrando en cada una de ellas la pérdida de presión que experimenta el fluido al atravesar una determinada longitud del tubo (Aguado, 1999).

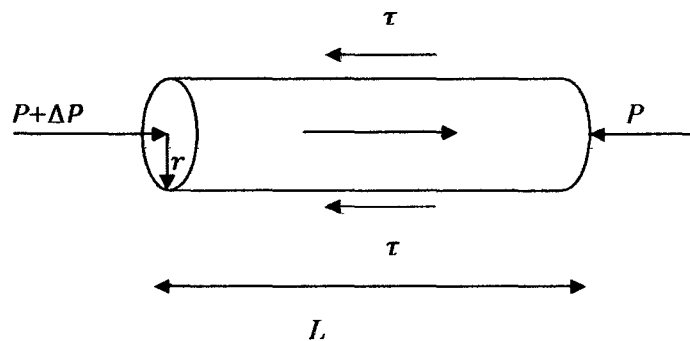


Figura 3. Viscosímetro de tubo, fuerzas que actúan sobre un tubo de fluido de radio r

De la figura. P es la presión aplicada al fluido, L longitud del tubo, r radio del tubo y τ esfuerzo de corte

Para fluidos newtonianos existen dos fuerzas que actúan sobre el fluido: fuerzas normales originadas por la presión del cilindro y fuerzas tangenciales del rozamiento sobre la superficie lateral (Aguado, 1999; Ibarz, 2005):

$$\tau = \frac{\Delta P r}{2 L} \quad (7)$$

$$Q_v = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 \mu L} \quad (8)$$

donde Q_v es el caudal volumétrico y μ es la viscosidad del fluido

Para fluidos pseudoplásticos se utiliza para determinar el caudal volumétrico la siguiente ecuación:

$$Q_v = \frac{\pi R^{3+1/n} \Delta P^{1/n}}{(3 + 1/n)(2 k L)^{1/n}} \quad (9)$$

Donde k índice de consistencia, L longitud del tubo y n es el índice de comportamiento al flujo

2.6 Definición de la reología

La reología se define como la ciencia que estudia la deformación y flujo de la materia (Ibarz, 2005; Sharma *et al.*, 2003; Dieter, 2001; Aguado *et al.*, 1999). Dieter (2001), menciona que la fluencia de los cuerpos fluidos y sólidos sometidos a la acción de una fuerza mecánica, es una disciplina física de importancia y fundamental para el conocimiento de la economía y tecnología de los materiales. Además, estudia la relación entre fuerzas ejercidas sobre un material y la deformación resultante como una función del tiempo (Rosenthal, 2001; Alvarado y Aguilera, 2001).

El comportamiento reológico de los alimentos ha sido definido como el estudio de la deformación y flujo de las materias primas sin procesar, productos intermedios o semielaborados, y productos finales, con el fin de evaluar la calidad preferida por el consumidor por medio de correlaciones entre las medidas reológicas y pruebas sensoriales, que consiste en evaluar la textura de los alimentos mediante procedimientos ópticos, de sensaciones a la ingestión y al tacto, permitiendo esclarecer la estructura o composición y

analizar los cambios estructurales que ocurren durante el proceso de acondicionamiento y elaboración a los que son sometidos, tanto la cantidad y el estado de los componentes que lo constituyen (Dieter, 2001).

Además, Sharma *et al.*, (2003), señala que las propiedades reológicas de los alimentos también sirven como medio para controlar o monitorear un proceso.

2.6.1 Definición de la viscosidad

Se define como la propiedad de un fluido que ofrece resistencia debida a las fuerzas de cizalla originando la pérdida de fuerza para fluir (Alvarado, 1996; Paúl Singh, 1998; Mott, 1996; Sharma *et al.*, 2003). Esta pérdida de energía es debida a la fricción en un fluido que fluye se debe a su viscosidad (Mott, 1996).

La tensión tangencial de las fuerzas de corte F que se aplica sobre el área A tendrá un esfuerzo cortante o de corte:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (10)$$

En la que τ es esfuerzo cortante (Pa), F es la fuerza aplicada (N) al fluido por unidad de área A en (m^2) (Sharma *et al.*, 2003).

2.6.2 Clasificación reológica de los Fluidos

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. Finalmente, existe otro grupo de alimentos que se comportan como fluidos viscosos y sólidos elásticos a la vez, es decir fluidos viscoelásticos.

La clasificación de los fluidos alimentarios según su comportamiento reológicos establece de la siguiente forma:

➤ Fluidos Newtonianos.

➤ Fluidos no-Newtonianos.

- Independientes del tiempo.

Plásticos de Bingham.

Pseudoplásticos.

Dilatantes.

- Dependientes del tiempo.

Fluidos tixotrópicos.

Fluidos reopécticos.

➤ Fluidos viscoelásticos.

A.- Fluidos newtonianos

Los fluidos newtonianos son aquellos en los que la tensión tangencial es directamente proporcional a la velocidad de deformación, cumpliendo la ley de la viscosidad de Newton.

(Agudo *et al.*, 1999):

$$\tau = \mu \gamma \quad (11)$$

donde μ es viscosidad del fluido (Pa.s), γ gradiente de deformación (s^{-1}) y τ es el esfuerzo de corte (Pa)

Para Aguado *et al.* (1999); Sharma *et al.* (2003); McCabe (1991), la viscosidad μ del fluido, propiedad física que depende fundamentalmente de la naturaleza, estado físico y temperatura del mismo. El comportamiento Newtoniano se presenta en casi todos los líquidos ordinarios como el agua, disoluciones acuosas de concentración no muy elevada y compuestos orgánicos de peso molecular bajo, también es característico de algunos gases.

B.- Fluidos no newtonianos

Son aquellos fluidos que no cumplen la ley de Newton de la viscosidad, tienen un comportamiento reológico anómalo, estos fluidos no suelen ser líquidos sino de naturaleza polimétrica o están constituidos por dispersiones de partículas sólidas. También se pueden tratar de emulsiones inmiscibles. Cuando este tipo de fluidos se someten a la acción de tensiones tangenciales, se suele producir cambios significativos en su microestructura, lo que se traduce en una variación de la viscosidad del fluido sufriendo alteraciones. (Aguado *et al.*, 1999; Dieter, 2001; Ibarz, 2005; Alvarado, 1996).

Aguado *et al.*, (1999) en los fluidos no newtonianos la viscosidad no es una propiedad física, se denomina viscosidad aparente.

2.6.3 Viscosidad Aparente

Las viscosidades de los líquidos son generalmente mucho mayores que las de los gases y comprenden varios órdenes de magnitud. La viscosidad de los líquidos disminuye considerablemente al aumentar la temperatura. La viscosidad del agua cae desde 1,9 cP a 0 °C hasta 0,28 cP a 100 °C mientras que un líquido aumenta con la presión, pero este efecto es generalmente insignificante para presiones inferiores a 40 atm (McCabe, 1991).

La 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 del flujo (Singh y Heldman, 1998; Geankoplis, 1995).

Alvarado y Aguilera (2001); Rosenthal (2001); Lewis (1993) manifiestan que para los fluidos no newtonianos se ha definido una viscosidad aparente; donde el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la velocidad de deformación

$$\mu_A = \frac{\tau}{\gamma} \quad (12)$$

La viscosidad aparente (μ_A) depende de las mismas condiciones que la viscosidad en fluidos Newtonianos, pero además es función del esfuerzo cortante (τ) o de la velocidad cortante (γ)

B.1.- Fluidos independientes del tiempo

Este tipo de fluidos presentan un comportamiento caracterizado por la existencia de una función de tipo general, con curvas representativas en el diagrama de tensión-deformación como se indica en la figura 4, (Hermida, 2000); Alvarado, 1996). Dentro de este grupo, los fluidos pseudoplásticos y dilatantes presentan características similares, la viscosidad aparente disminuye con el aumento del esfuerzo cortante.

Mientras, Aguado et al, (1999) describe que la ecuación de este tipo de fluidos, su viscosidad aparente no depende del tiempo de actuación de la tensión tangencial, ya que los cambios que provoca esta última se desarrolla de forma instantánea.

Existen diferentes tipos de fluidos independientes del tiempo según la forma de curvas.

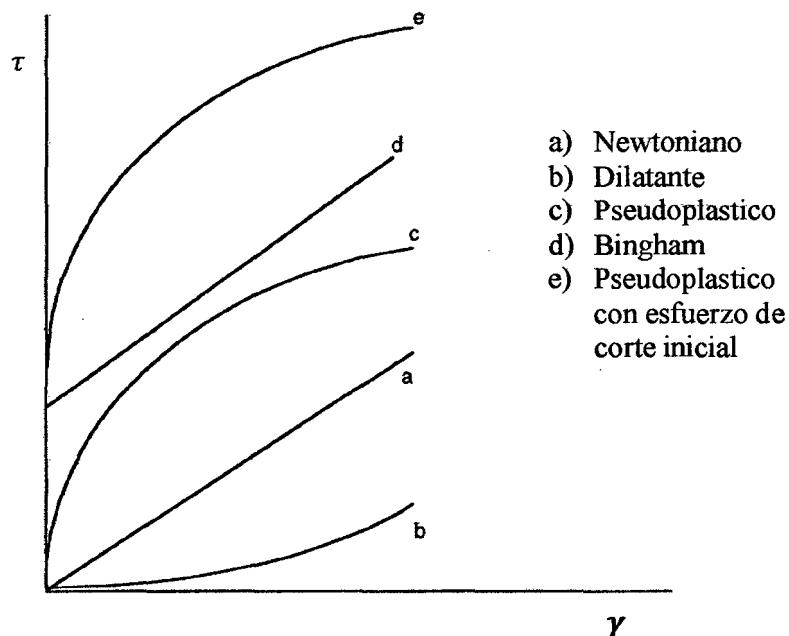


Figura 4. Esfuerzo de cortante frente a gradiente de velocidad para fluidos alimentarios según su comportamiento reológico (Mc Cabe, 1991).

- **Fluidos pseudoplásticos.**

La relación $\tau - \gamma$ se ajusta a una curva cóncava respecto al eje de las abscisas y que pasa por el origen de coordenadas. La viscosidad aparente disminuye al aumentar la tensión tangencial aplicada o la velocidad de deformación (Aguado et al, 1999; Singh, 1998).

La curva cóncava al no pasar por el origen de las coordenadas, indica un esfuerzo de corte inicial denominándose fluidos pseudoplásticos con un esfuerzo de corte inicial, manteniéndose la disminución de la viscosidad aparente al aumentar la tensión tangencial aplicada o la velocidad de deformación (Mc Cabe, 1991).

- **Fluidos dilatantes (ley de potencia y Ostwald de Waele)**

$$\tau = k\gamma^n \quad (13)$$

Donde k recibe el nombre de índice de consistencia (Pa.s^n) y n índice de comportamiento que es adimensional, donde los valores de n dependerán del tipo de fluido: pseudoplásticos ($n < 1$), dilatantes ($n > 1$) y para ($n = 1$) cuando los fluidos son newtonianos. La ley de la potencia se puede linealizar tomando logaritmos en ambos miembros

$$\log \tau = \log k + n \log \gamma \quad (14)$$

La viscosidad aparente de los fluidos pseudoplásticos o dilatantes se puede expresar en función de la velocidad de deformación

$$\mu_A = k\gamma^{n-1} \quad (15)$$

- **Fluidos plásticos de Bingham**

El comportamiento reológico de este tipo de fluidos se describe mediante el modelo de Bingham:

$$\begin{aligned} \gamma &= 0; \text{ si } \tau < \tau_c \\ \tau &= \tau_c + n\gamma, \quad \text{ si } \tau \geq \tau_c \end{aligned} \quad (16)$$

donde τ_c Tensión de fluencia y n rigidez o viscosidad plástica

- **Fluidos plásticos reales o mixtos**

Los modelos reológicos más utilizados para describir los fluidos plásticos reales es el de **Herschel - Bulkley**, que es válido tanto para los fluidos newtonianos y fluidos no newtonianos independientes del tiempo:

$$\tau = \tau_c + k \gamma^n \quad (17)$$

en donde τ esfuerzo cortante, τ_c tensión de fluencia o tensión tangencial, K índice de consistencia, γ velocidad de deformación y n índice de comportamiento

Otro modelo que se aplican con frecuencia a fluidos plásticos reales es el de **Casson**:

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_c} + k \sqrt{\gamma} \quad (18)$$

De acuerdo a esta expresión la representación gráfica de $\sqrt{\tau} - \sqrt{\gamma}$ es una recta de pendiente K y ordenada en el origen $\sqrt{\tau_c}$.

Tabla 4. Características y modelos matemáticos para fluidos independientes del tiempo

FLUIDO	k	n	τ_0	ECUACIÓN	EJEMPLOS TÍPICOS
Newtoniano	> 0	1	0	$\tau = \mu\gamma$	Se aplica en el agua y en soluciones diluidas, por ejemplo: Jugos de frutas clarificadas, despectinizados, miel, aceites de vegetales, té, café, jalea y dispersiones diluidas de partículas esféricas.
Pseudoplástico	> 0	$0 < n < 1$	0	$\tau = k\gamma^n$	Se ha aplicado a una gran variedad de productos alimenticios. Por su facilidad de manejo en la forma logarítmica. Ejemplos: Jugo concentrado de naranja, puré de banana, salsa de manzana, zumos de fruta, leche concentrada, compotas, mermeladas, mayonesa, mostaza, sopas de vegetales.
Plástico	> 0	1	> 0	$\tau = \tau_0 + k\gamma$	Una característica importante de este modelo es la incorporación de un umbral de fluencia. Ejemplos: Pasta de tomate, pasta dental, mayonesa, margarina, mantequilla, grasas, algunos tipos de chocolates fundidos, crema batida, clara de huevo batido.
Herschel-Bulkley	> 0	$0 < n < 1$	> 0	$\tau = \tau_0 + k\gamma^n$	Este modelo tiene un amplio rango de aplicaciones en productos biológicos y de alimentos. Es un modelo general que tiene como casos particulares los tres modelos anteriores, por ejemplo: Pasta de pasas, pasta de pescado.
Dilatante	> 0	$1 < n < \infty$	0	$\tau = k\gamma^n$	Algunos tipos de miel, suspensión al 40%, almidón de maíz, mantequilla de cacahuete.

Fuente: Singh (1998), Alvarado (1996), Hermida (2000)

B.2- Fluidos dependientes del tiempo

La viscosidad aparente de algunos fluidos depende no solo de la velocidad de deformación sino también del tiempo que se mantiene la deformación. Entre las que se encuentran los de comportamiento: tixotrópico y Reopéctico. (Hermida, 2000), además, Ibarz (1998), aporta que ambos son atribuidos al cambio continuo de la estructura del material, que puede ser en cualquier caso reversible o irreversible.

Cuando un material está en reposo durante un tiempo suficiente para reconstruir su estructura es sometido a un gradiente de velocidad dado, su estructura puede ser destruida progresivamente, de forma que la viscosidad aparente disminuye con el tiempo. Del mismo modo, el valor de la velocidad de regeneración de la estructura aumenta con el tiempo, conforme aumenta el número de posibles nuevos enlaces. Se alcanzara un estado de equilibrio dinámico, cuando ambos valores de velocidad se igualen. (Hermida, 2000; Aguado *et al.*, 1999).

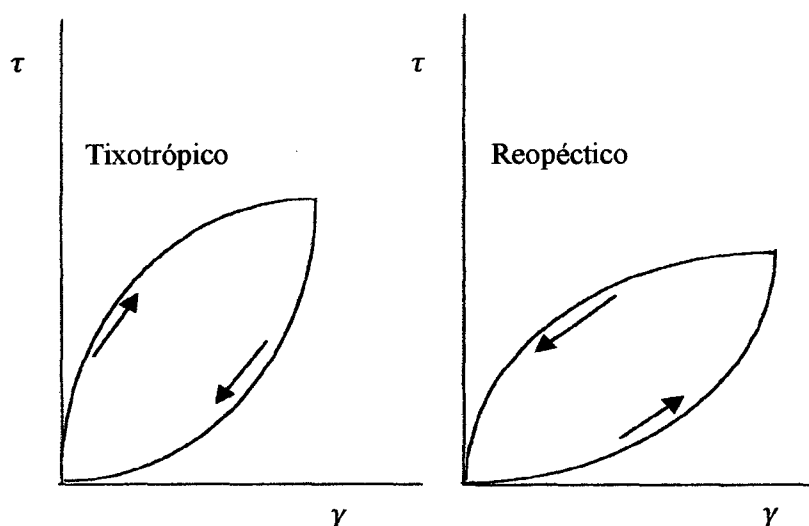


Figura 5. Fluidos no newtonianos dependientes del tiempo

C. Fluidos viscoelásticos

Se trata de un caso especial de los fluidos con propiedades intermedias entre el comportamiento elástico y el plástico. Se suele presentar en sustancias de naturaleza polimétrica como los geles (Aguado *et al.*, 1999). Los materiales viscoelásticos presentan comportamientos característicos que los diferencian notablemente de los otros fluidos. Si un fluido Newtoniano se hace salir en chorro de una tubería, se produce una contracción en el diámetro del chorro; mientras que un fluido viscoelástico, se produce un ensanchamiento muy remarcado en el diámetro del chorro (Ibarz, 2005).

2.6.4 Variables que influyen sobre la consistencia de fluidos

a) Efecto de la temperatura

La temperatura es uno de los factores que mayor efecto tiene sobre las propiedades reológicas de los alimentos (Aguado *et al.*, 1999).

Los alimentos fluyen durante todo el proceso de elaboración, almacenamiento, transporte, venta y consumo, están sujetos a variaciones continuas en su temperatura. Es por ello, que resulta importante conocer las propiedades reológicas de los productos en función de la temperatura (Ibarz, 2005).

También Aguado *et al.* (1999) define que para los líquidos newtonianos, la relación μ -T se suele expresar mediante la ecuación de Arrhenius:

$$\mu = \mu_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (19)$$

siendo μ_0 factor pre exponencial; E_a la energía de activación (kJ/mol); T temperatura absoluta, R constante universal de los gases (kJ/mol°K)

Para varios datos de viscosidad a diferentes temperaturas, los parámetros se pueden calcular mediante regresión lineal, una vez tomado logaritmos neperianos.

$$\ln \mu = \ln \mu_0 + \frac{E_a}{RT} \quad (20)$$

b) Efecto de la concentración sobre la viscosidad

El efecto de la concentración que se ejerce sobre un sistema homogéneo es el de aumentar la viscosidad o índice de consistencia; la mayoría de información existente se refiere a derivados de frutas en los que se estudia el contenido en sólidos solubles, contenido en pectinas, sólidos totales, etc. La siguiente ecuación es la aplicada a zumos de frutas para determinar la concentración sobre la viscosidad (Ibarz, 2005):

$$Y = K_1 C^{A_1} \quad (21)$$

$$Y = K_2 \exp(A_2 C) \quad (22)$$

en donde Y puede ser la viscosidad o índice de consistencia; K_1 y K_2 son constantes de proporcionalidad expresado en $\text{Pa} \cdot \text{s}^\circ\text{Brix}$; A_1 y A_2 constante de proporcionalidad adimensional y C es la concentración en $^\circ\text{Brix}$

c) Efecto combinado temperatura y concentración

Según, Velez y Barboza (1997) cita el efecto combinado de la temperatura y concentración utilizando las ecuaciones de regresión múltiple logaritmando la ecuación que se muestra a continuación:

$$\ln k = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{T} \right) + \beta_2 X \quad (23)$$

Donde β_0 , β_1 y β_2 son constantes, T la temperatura absoluta, mientras X es la concentración.

3 MATERIALES Y MÉTODO

3.1 Lugar de Ejecución

El procesamiento de los datos para las medidas reológicas de la pulpa de tuna en el presente trabajo de investigación se desarrolló en el Laboratorio de Análisis e Instrumentación y en el Laboratorio de Química de la Escuela Académica Profesional de Ingeniería de Alimentos - Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión (Lima).

3.2 Materiales y Equipos

3.2.1 Materia Prima

- En el presente trabajo fueron utilizados 10 L. de pulpa de tuna (*Opuntia ficus indica*) a 15 °Brix, que fueron obtenidos del valle de Pachachaca de la provincia de Abancay.
- Sacarosa
- Agua destilada

3.2.2 Equipos

- Reómetro rotacional (Brookfield DV-III+, 0.1 a 250 RPM, USA)
- Despulpadora marca INOXTRON capacidad de 200 Kg/h
- Baño maría (Mettler, 10 a 95 ±0.25 °C, 7 L. Alemania)
- Balanza analítica (Sartorius, Modelo BL210S, 320 ± 0.0001 g, Alemania)
- Refractómetro (Atago NI, (18 – 32) ± 0.1 °Brix, Japón)
- Termómetro (Boeco, -10 a 150 °C, Alemania)

- Refrigeradora modelo - GM-328QC
- Vasos de precipitado de 500 ml
- Varilla de vidrio

3.3 METODOLOGÍA

3.3.1 Preparación de la muestra

Se procedió a lavar 20 kg de tuna con agua potable y se pelaron para desechar la cascara, luego se procedió a pulpear 12 kg de tuna pelada mediante la despulpadora mecánica con capacidad de 200 kg/h, de donde se obtuvo la pulpa sin la presencia de semillas para evitar interferencias en las medidas reológicas.

En la pulpa obtenido, se evaluó la concentración de sólidos solubles (°Brix) con un refractómetro, cuya lectura se realizó de 15 °Brix y la densidad registrando 1032 kg/m³, la cual posteriormente se almaceno a una temperatura de 10 ° C, en una refrigeradora modelo - GM-328QC.

En la Figura 6, se muestran el diagrama de obtención y los parámetros de evaluación reológica de la pulpa de tuna.

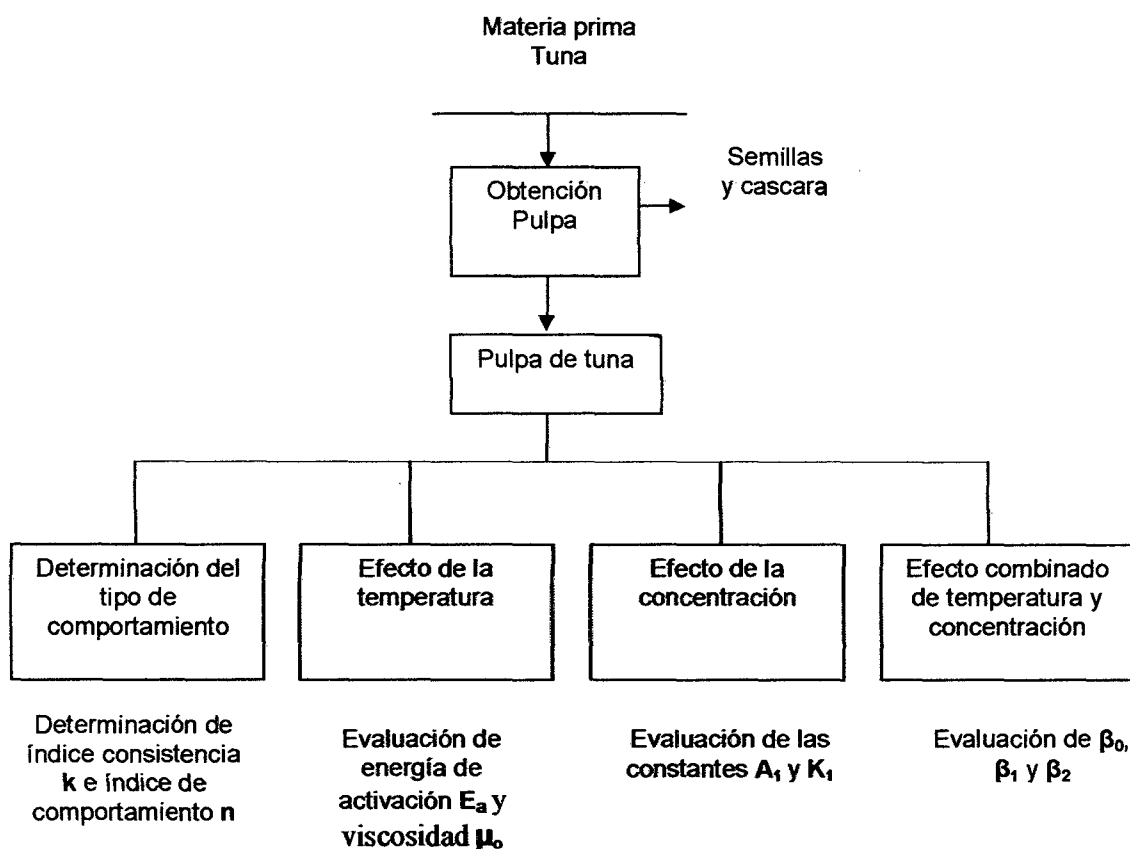


Figura 6. Diagrama de flujo para el análisis reológico de la pulpa de tuna

3.3.2 Análisis Fisicoquímico

Las propiedades fisicoquímicas de la pulpa de tuna, es un análisis complementario a la tesis, los cuales se realizaron en la Universidad Nacional Santiago de Estero (UNSE) - Argentina; se determinó la humedad, ceniza, proteína, grasa, carbohidratos, fibra y densidad; según la metodología AOAC (1983).

3.4 MEDIDAS REOLÓGICAS

3.4.1 Diseño del experimento

El diseño experimental usado para determinar la influencia de la concentración (°Brix) y la temperatura (°C) sobre el comportamiento reológico de la pulpa de tuna e índice de consistencia (k) fue el diseño en bloques completamente al azar (DBCA). La evaluación de los datos obtenidos fue evaluada con la ayuda del Software STATGRAPHICS plus 5.1 y Microsoft Excel 2010. La evaluación consistió en determinar el diseño de bloques 5x5, realizándose un total de 25 tratamientos; los ensayos fueron realizados por triplicado, realizándose 75 observaciones.

Se estudió el efecto de dos variables (factores: temperatura y concentración) y sus interacciones sobre la respuesta (resultado) de índice de consistencia, índice de comportamiento, energía de activación y la influencia del efecto combinado entre la temperatura y concentración.

Tabla 5. Diseño experimental de la determinación reológica de la pulpa de tuna

Concentración	Temperaturas					Repeticiones
	10 °C	25 °C	40 °C	55 °C	70 °C	
10 °Brix	Y _{1,1}	Y _{1,2}	Y _{1,3}	Y _{1,4}	Y _{1,5}	3
15 °Brix	Y _{2,1}	Y _{2,2}	Y _{2,3}	Y _{2,4}	Y _{2,5}	3
20 °Brix	Y _{3,1}	Y _{3,2}	Y _{3,3}	Y _{3,4}	Y _{3,5}	3
25 °Brix	Y _{4,1}	Y _{4,2}	Y _{4,3}	Y _{4,4}	Y _{4,5}	3
30 °Brix	Y _{5,1}	Y _{5,2}	Y _{5,3}	Y _{5,4}	Y _{5,5}	3

En la Tabla 5 se presentan las variables independientes (temperatura y concentración) y las variables dependientes ($Y_{1,1}, \dots, Y_{5,5}$) que son índice de consistencia, índice de comportamiento, también llamados variable respuesta. El análisis de la influencia de las variables y el efecto combinado, fue evaluado mediante el análisis de varianza (ANOVA), mediante la prueba F-Snedecor, tomando como nivel de confianza de probabilidad $p = 0,05$.

A la vez se aplicó un análisis de regresión múltiple para encontrar un modelo matemático que represente el efecto combinado de la temperatura y la concentración en la pulpa de tuna. Gutiérrez y De la Vara (2008), describen la ecuación del modelo ajustado para una regresión lineal múltiple, siendo el siguiente:

$$K = \beta_0 - \beta_1 T - \beta_2 C - \beta_3 TC - \beta_4 T^2 - \beta_5 C^2 + \varepsilon \quad (24)$$

dónde $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ son constantes de la ecuación modelo; y las variables en estudio de temperatura (T), Concentración (C); k valor promedio del índice de consistencia de la pulpa de tuna y ε es el error

3.4.2 Determinación experimental

- Las medidas reológicas de la pulpa de tuna fueron realizados con un reómetro rotacional Brookfield DV-III⁺ con la ayuda del software Rheocalc versión 3.2.
- Para las corridas se utilizaron 400 ml de muestra por ensayo, utilizándose las variables de concentraciones de 10, 15, 20, 25, y 30 °Brix; y temperaturas de 10, 25, 40, 55 y 70 °C conforme se observa en la Tabla 5 del diseño experimental. Todas las muestras se realizaron por triplicado para tener mayor confiabilidad en los datos.

- Las muestras requeridas de concentraciones superiores a 15°Brix, se le añadió sacarosa para obtener la concentración requerida.
- Para alcanzar las temperaturas superiores al del ambiente, fue tratado en baño María hasta llegar a la temperatura deseada, la que fue medido con un termómetro.
- La pulpa de tuna de 400 ml, fueron colocados en un vaso de precipitado de 500 ml y acondicionados al reómetro rotacional Brookfield DV-III⁺.
- Los diferentes husillos fueron colocados al reómetro de acuerdo a las concentraciones y temperaturas evaluadas, trabajando con los spindle o huesillo N° 2 y spindle o huesillo N° 3.
- Los datos de medidas reológicas fueron tomados en un reómetro de velocidad rotacional interno en un rango de 0,1 a 100 (s⁻¹).
- Los datos de esfuerzo de corte τ (Pa), velocidad de corte γ (s⁻¹) y viscosidad (Pa.s) fueron registrados usando el Software Reocalc versión 3.2.
- A partir de estos valores fue posible calcular todo los parámetros reológicos de acuerdo al diseño metodológico utilizada de DBCA (Tabla 5).

3.4.3 Determinación de parámetros reológicos: Índice de Comportamiento de Flujo (n) y Coeficiente de Consistencia (k)

Para los cálculos de los parámetros reológicos fueron utilizados los datos que se registraron con el reómetro rotacional Brookfield DV-III⁺ en el Software Reocalc versión 3.2 de acuerdo a los siguientes pasos.

- a. De los datos obtenidos del esfuerzo de corte τ (Pa) y velocidad de corte γ (s⁻¹) se graficó el esfuerzo cortante con la velocidad de corte para determinar el tipo de

- comportamiento reológico de la pulpa de tuna en función a cada temperatura y concentración.
- b. Los puntos obtenidos de la gráfica τ vs γ se ajustaron a la ley de la potencia (Ecuación 4), y se observa en dicha grafica la representación de una curva cóncava respecto al eje de abscisas, teniendo un esfuerzo de corte inicial τ_0 .
 - c. Aplicando las líneas de tendencia potencial se determinó el índice de consistencia k (Pa.s^n) e índice de comportamiento n (adimensional) de la pulpa de tuna.

3.4.4 Determinación del modelo o tipo de fluido reológico

De los datos registrados por el reómetro se graficó con la ayuda del Software STATGRAPHICS plus 5.1, una curva cóncava respecto del esfuerzo de corte versus velocidad de corte, por tanto, los datos al ajustarse a la ley de la potencia, se evaluó el índice de comportamiento (n) para determinar qué modelo o tipo de fluido reologico pertenece la pulpa de tuna: cuando $n < 1$ pertenece a un fluido pseudoplastico, cuando $n > 1$ fluido dilatante y cuando $n = 1$ fluido Newtoniano.

Con la ayuda de Microsoft Excel se determinó el índice de consistencia (k), índice de comportamiento (n); aplicando las líneas de tendencia potencial en las curvas mostrándose las ecuaciones potenciales y los coeficientes de correlación (R^2).

3.4.5 Efecto de la temperatura sobre los parámetros reológicos

Para determinar el efecto de la temperatura sobre las propiedades reológica de la pulpa de tuna se aplicó el modelo de la ecuación de Arrhenius (Ecuación 19 y 20). Donde se calculó la energía de activación (E_a) linealizando el índice de comportamiento ($\ln k$) vs temperatura absoluta ($1/T$) mostrando la siguiente ecuación lineal: $Y = a+bx$. De la cual se extrae la pendiente y se determina la energía de activación mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{E_a}{R} = b \quad (25)$$

Donde, b es la pendiente de la recta

3.4.6 Efecto de la Concentración sobre los Parámetros Reológicos

El efecto de la concentración sobre los parámetros reológicos fue analizada y usando el modelos potencial, graficando índice de consistencia vs concentración de acuerdo a la ecuación (Ecuación 21 y 22) y para llegar a las concentraciones deseadas se añadió sacarosa a la pulpa de tuna.

3.4.7 Efecto combinado entre la temperatura y concentración

Para determinar el efecto combinado de la temperatura y la concentración, se utilizó el modelo matemático de regresión lineal múltiple (Ecuación 24), para evaluar los cambios producidos en el índice de consistencia dentro de un rango de concentración 10 a 30 °Brix y a un intervalo de temperatura de 10 a 70 °C en la pulpa de tuna.

4 RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Análisis fisicoquímico

Se determinó las propiedades fisicoquímicas de la pulpa de tuna (*Opuntia ficus indica*) variedad amarillo, los resultados se muestra en la Tabla 6 en base a 100 g de muestra, en comparación con los datos encontrados por Sáenz (2006), la tuna variedad amarilla registra valores más altos en cuanto al contenido de azúcares solubles: 15 °Brix, proteína: 0,99 %, carbohidratos: 10,48 %, fibra: 3,16 % y ceniza: 0,51 %.

La tuna variedad roja, presenta un mayor contenido de humedad 90,6 % según datos presentados por la FAO; Sáenz (2006), reporto un contenido de humedad de 85,6 % en tuna amarilla, superior al encontrado en los ensayos realizados, de 84,23% de humedad.

Tabla 6. Composición fisicoquímico de la pulpa de tuna

Componente	Determinado*	Sáenz	FAO
Densidad (kg/m ³)	1 032,00		
Grados Brix	15,00	14,06	
Humedad (g/100g)	84,23	85,60	90,60
Proteínas (g/100g)	0,99	0,82	0,50
Carbohidratos**	10,48		8,00
Fibra (g/100g)	3,16	0,23	0,50
Cenizas (g/100g)	0,51	0,44	0,40

*Se tomaron datos promedios

** Se consideró como la suma de azúcares totales y pectina

4.2 Determinación del comportamiento reológico de la pulpa de tuna

Los datos obtenidos fueron procesados con la ayuda del Software STATGRAPHICS plus 5.1 y Microsoft Excel 2010. Las variables que se evaluaron son el índice de consistencia k ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$) y el índice de comportamiento de flujo (n); en la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos.

Las gráficas que se realizaron para determinar el tipo de comportamiento que tiene la pulpa de tuna, se evaluó a las temperaturas de 10, 25, 40, 55 y 70 °C y a concentraciones de 10, 15, 20, 25 y 30 °Brix, observándose una curva cóncava respecto al eje de las abscisas y una variación de la viscosidad al aumentar el esfuerzo de corte aplicado, además se observa que tiene un leve esfuerzo de corte inicial. Las Figuras 7, 8, 9, 10 y 11, muestran las curvas de flujo en función al esfuerzo de corte y velocidad de corte

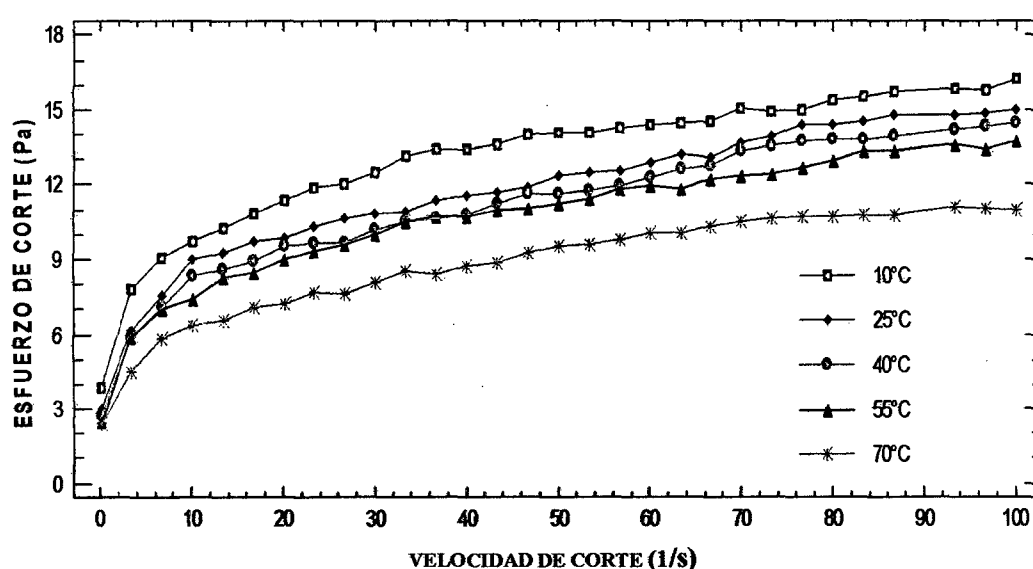


Figura 7. Reograma de la pulpa de tuna a 10 °Brix

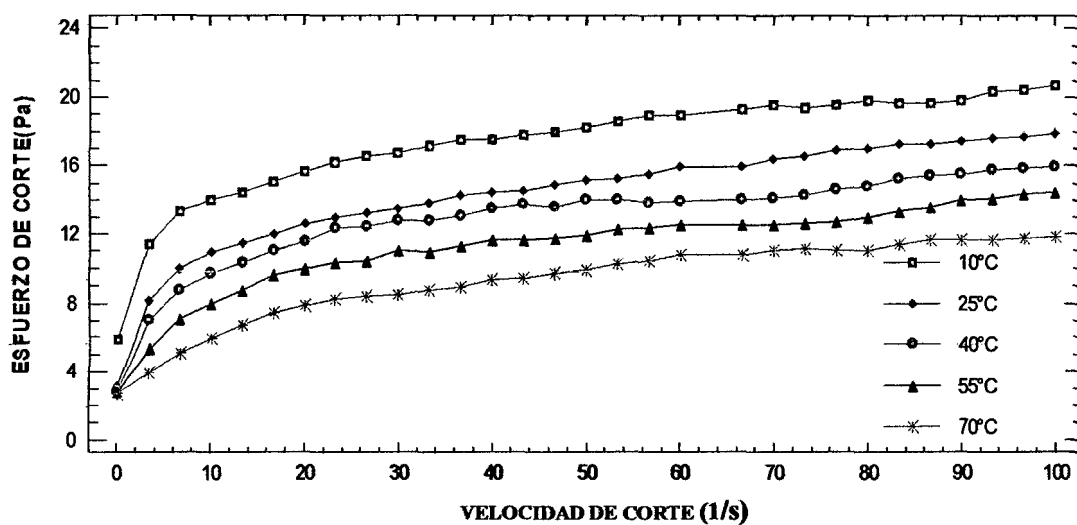


Figura 8. Reograma de la pulpa de tuna a 15 °Brix

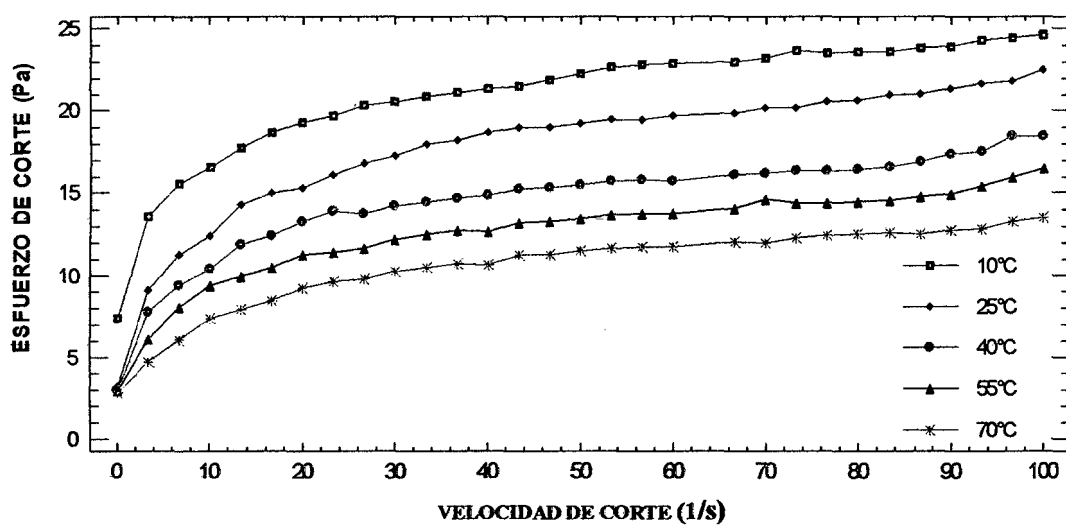


Figura 9. Reograma de la pulpa de tuna a 20 °Brix

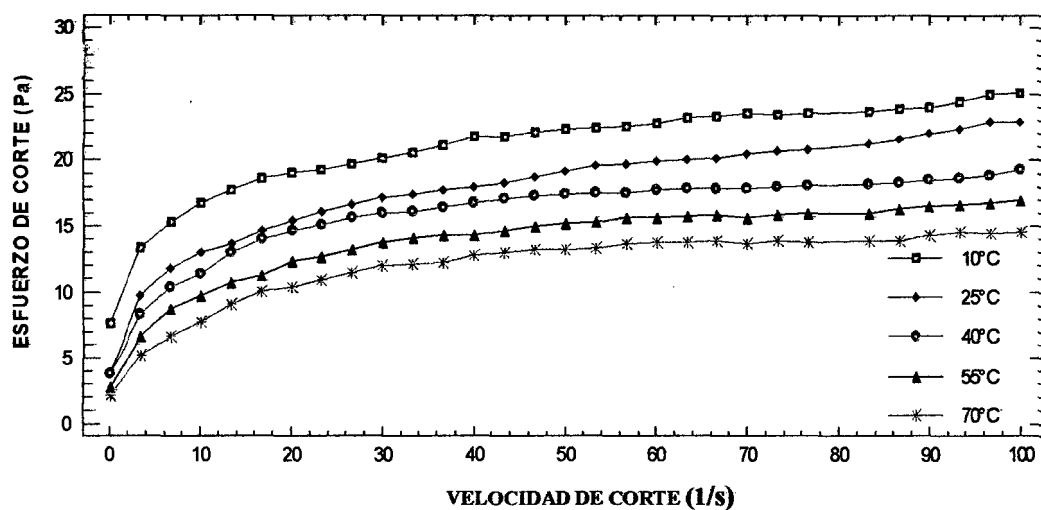


Figura 10. Reograma de la pulpa de tuna a 25 °Brix

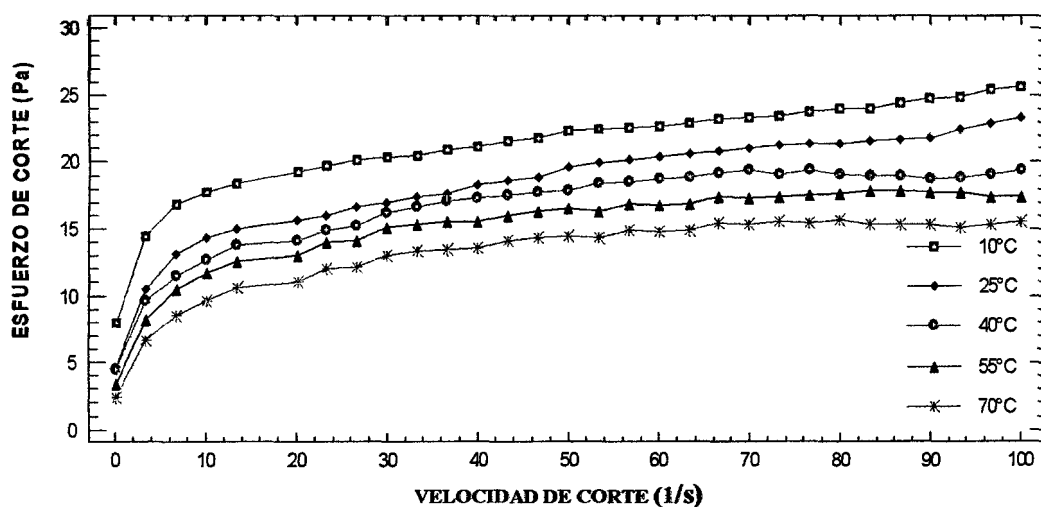


Figura 11. Reograma de la pulpa de tuna a 30 °Brix

Tal como se puede observar en las Figuras 7, 8, 9, 10 y 11; la pulpa de tuna en los rangos de temperaturas y concentraciones estudiados, se ajusta adecuadamente al modelo de la ley de la potencia, presentando un comportamiento pseudoplástico con un esfuerzo de corte inicial, la misma que se encuentra dentro de los fluidos no-newtonianos e

independientes del tiempo; esta afirmación se confirma con los valores del índice de comportamiento al flujo (n) siendo menores que la unidad en todo los tratamientos ($0,246 < n < 0,432$) (Tabla 7), estos datos son similares a los registrados por Alvarado y aguiera (2001), Hermida (2000), Singh (1998), Alvarado (1996); reafirmando que la pulpa de tuna presenta un comportamiento pseudoplástico al encontrarse dentro del rango $0 < n < 1$. Además, Rao (1986); Vélez y colaboradores (1991); Vitali y Rao (1982); Irazábal (1981) y Aguado (1999); citado por Alvarado J. (1996), mencionan, que la mayoría de los fluidos alimenticios como por ejemplo jugos concentrados, pulpa de frutas y vegetales, puré de frutas, concentrados proteicos, entre otros son fluidos no-newtonianos y presentan un comportamiento pseudoplástico.

Los reogramas de esfuerzo cortante en función a velocidad de cortes presentados en estas figuras a temperaturas de 10 a 70 °C son paralelas y similares debido a que al aumentar la temperatura el índice de consistencia va disminuyendo, perdiendo viscosidad (Anexo 1), este comportamiento también se observó en la pulpa de pera presentado por Muñoz *et al.* (2009), al registrar una variación del esfuerzo de corte en función a los cambios de temperatura, lo cual puede ser explicado por un posible aumento de movilidad de partículas suspendidas en el fluido.

Tabla 7. Resultados de parámetros reológicos calculados de la ley de la potencia para la pulpa de tuna

Concentración	Parámetros	10 °C	25 °C	40 °C	55 °C	70 °C
10 °Brix	k	5,696	4,503	4,135	3,987	3,369
	n	0,321	0,367	0,380	0,314	0,369
	R ²	0,902	0,912	0,916	0,989	0,936
15 °Brix	k	8,676	5,552	5,065	4,237	3,251
	n	0,269	0,365	0,360	0,375	0,401
	R ²	0,864	0,846	0,831	0,905	0,966
20 °Brix	k	10,664	6,230	5,492	4,785	3,917
	n	0,263	0,402	0,373	0,372	0,381
	R ²	0,872	0,832	0,830	0,884	0,934
25 °Brix	k	10,604	6,635	6,391	4,914	3,860
	n	0,265	0,381	0,351	0,397	0,432
	R ²	0,897	0,872	0,837	0,853	0,857
30 °Brix	k	11,362	7,544	7,256	6,175	4,768
	n	0,246	0,345	0,322	0,349	0,392
	R ²	0,864	0,860	0,837	0,812	0,805

En la Tabla 7, se presentan los datos de índice de consistencia (k) y el índice de flujo (n), el modelo de la ley de la potencia es adecuado para describir el flujo en pulpa de tuna al obtener el coeficiente de determinación $0,805 < R^2 < 0,966$ e índices de comportamiento de flujo de $0,246 < n < 0,432$, estos intervalos de comportamiento ha sido reportado por Matos (2010), en pulpa de tuna blanca, encontrados datos de $0,233 < n < 0,881$ a concentraciones 13 a 27 °Brix y temperaturas de 25 a 65 °C; Andrade *et al.* (2010), registro

0,027 < n < 0,133 en pulpa de Zapote de 29,26 °Brix a temperaturas de 10 a 65 °C; Andrade (2009) encontró de 0,119 < n < 0,224 en la pulpa de níspero de 17,5 °Brix y en el intervalos de temperatura de 10 a 70 °C; en la pulpa de pera encontró también 0,247 < n < 0,504 de 12,5 a 28 °Brix a temperaturas de 30 a 65 °C).

Por otra parte se graficó también la viscosidad frente a la velocidad de corte (Anexo 1) en la que se observó la disminución de la viscosidad en función a la velocidad de corte, lo que confirma la pseudoplasticidad de la pulpa de tuna; los valores de viscosidad o índice de consistencia se encuentran dentro de los intervalos de 3,251 < k < 11,362, que comparado con otras pulpas tienen similares parámetros presentados por Muñoz *et al.* (2009) y Andrade *et al.*, (2009).

Para determinar cuál de las curvas presenta una mayor pseudoplasticidad, se evaluó el índice de comportamiento de flujo (n) mediante un análisis de varianza (ANOVA) y una comparación de medias - Diferencia mínima significativa (LSD), obtenido a concentraciones de 10, 15, 20, 25 y 30 °Brix, y temperaturas 10, 25, 40, 55 y 70 °C (ver Anexo 3); de cuyos resultados del análisis de varianza (ANOVA), se concluye que la concentración no influye en el índice de comportamiento de flujo, mientras que la temperatura si influye en este parámetro de flujo disminuyendo la pseudoplasticidad. De los resultados del LSD, se determina que a una concentración de 10 y 15 °Brix presentan un menor pseudoplasticidad al observar que los datos se alejan del valor cero (Tabla 7), mientras que a concentraciones de 20, 25 y 30 °Brix presentan una mayor pseudoplasticidad; para el caso de temperatura, a 10 y 25 °C muestran una mayor pseudoplasticidad en comparación a 40, 55 y 70 °C que registran una menor pseudoplasticidad; manifestando que a bajas concentraciones y temperaturas son inversamente proporcionales en el índice de comportamiento al flujo.

En el presente trabajo se constató que el índice de comportamiento (n) reológico fue influenciado por la temperatura, tal como se observan en Tabla 7, cuando aumenta la temperatura aumenta el índice de comportamiento de flujo, mientras disminuye el índice de consistencia. Este mismo comportamiento lo observaron Da Silva *et al.*, (2005) y Guan *et al.* (2008), esto significa que el valor de n varía a medida que aumenta la temperatura por lo que produce una menor pseudoplasticidad.

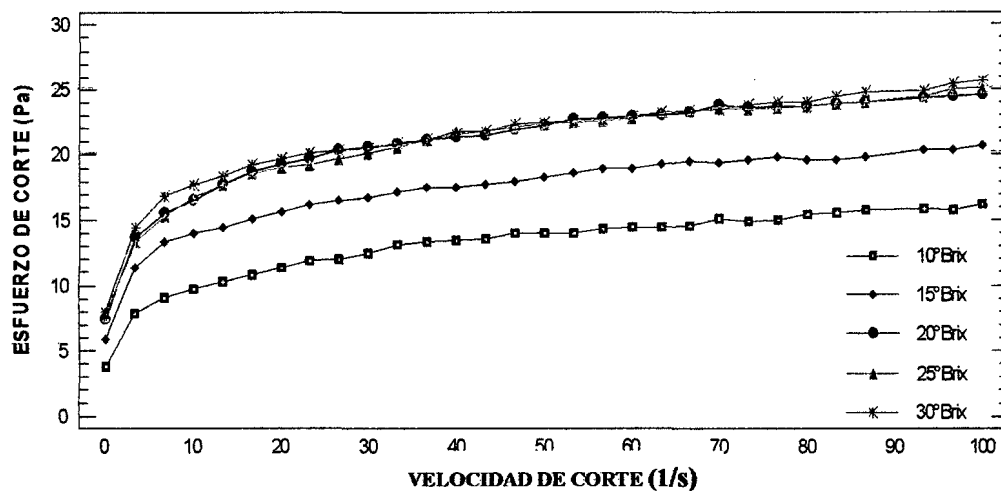


Figura 12. Reograma del comportamiento reológico de la pulpa de tuna en función a la temperatura a 10 °C

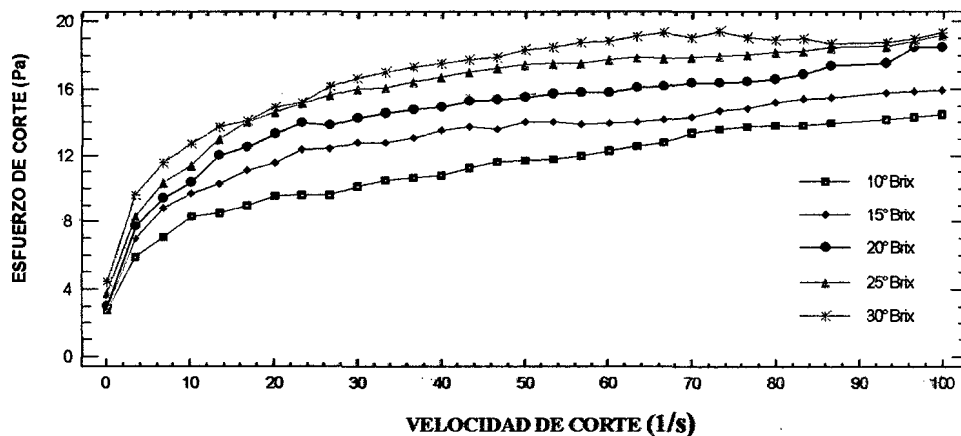


Figura 13. Reograma del comportamiento reológico de la pulpa de tuna en función a la temperatura a 40 °C

En las Figuras 12 y 13 y demás figuras (Anexo 2), se muestran los comportamiento reológico de la pulpa de tuna con sus respectivos líneas de ajuste a la Ley de la Potencia, donde se observa que a mayor concentración presenta un mayor esfuerzo de corte esta variación se produce debido a la presencia de partículas suspendidas en el fluido estudiado y como también la pulpa está constituido por una serie de componentes complejo como moléculas de pectina, proteínas, fibras, azúcares, entre otros, que forman enlaces entre ellas según lo descrito por Alvarado (1996); también se describe que con el aumento de la temperatura disminuye el esfuerzo de corte; esto debido a que a mayor temperatura se rompen los enlaces entre moléculas y partículas liberando el líquido ocluido. Todos estos fenómenos hacen que disminuya la fuerza de rozamiento, la consistencia y la resistencia al flujo. Los fluidos pseudoplásticos son las que con mayor frecuencia sufre este tipo de comportamiento dentro de los fluidos no-newtonianos.

4.3 Efecto de la temperatura en el índice de consistencia

El efecto de la temperatura sobre el índice de consistencia se describe mediante la ecuación de Arrhenius (Ecuación. 19 y 20), se evaluó los parámetros de concentración a 10 - 30 °Brix y temperaturas de 10 - 70 °C, siendo esta ecuación muy utilizada en la mayoría de los alimentos, como son jugos, jugos concentrados, purés, entre otro (Alvarado, 1996; Barbosa y Peleg, 1982); al correlacionar el logaritmo del índice de consistencia contra el inverso de la temperatura absoluta y aplicándose la linealidad prevista por el modelo (Ecuación 20).

En la Tabla 8 se muestran los resultados calculados, donde los datos se ajustan al modelo de Arrhenius ($0,926 < R^2 < 0,957$) y los valores de energía de activación al flujo varían en el rango de $6,345 < E_a < 12,532$; en función a diferentes concentraciones y temperaturas.

Tabla 8. Efecto de la temperatura en el índice de consistencia (k) en la pulpa de tuna y la determinación de la energía de activación (E_a)

	10 °Brix	15 °Brix	20 °Brix	25 °Brix	30 °Brix
1/T (°K)	Ln (k)				
0,0035	1,7398	2,1605	2,3669	2,3612	2,4303
0,0034	1,5048	1,7141	1,8294	1,8923	2,0207
0,0032	1,4194	1,6223	1,7033	1,8549	1,9818
0,0030	1,3830	1,4439	1,5654	1,5921	1,8205
0,0029	1,2147	1,1790	1,3654	1,3507	1,5620
E_a (kJ/mol)	6,345	12,072	12,353	12,532	10,455
Ln μ_0	0,997	3,036	3,003	3,028	2,073
R^2	0,942	0,957	0,926	0,950	0,937

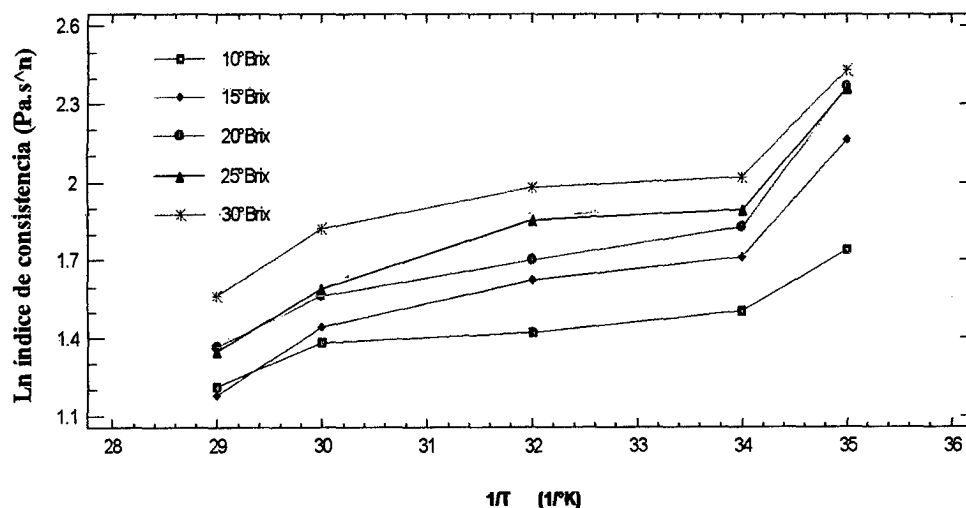


Figura 14. Efecto de la temperatura en el índice de consistencia de la pulpa de tuna

Como puede observarse en la Figura, 14 y Tabla 8, la influencia de la temperatura sobre el índice de consistencia disminuye con el aumento de la temperatura; este mismo comportamiento fue observado por; Ibarz, (2005); Andrade (2010), en la pulpa de zapote en temperaturas de 10 a 65 °C y por Dak *et al.*, (2008) en pulpa de tomate.

Por lo cual se indica que la pulpa de tuna se vuelve menos consistente a medida que se incrementa la temperatura, es posible que la pulpa haya perdido humedad debido al aumento de la velocidad de corte y al aumento de la temperatura, provocando que las macromoléculas no interaccionen entre sí o que las partículas se desplazan hacia a la superficie a consecuencia del incremento de la temperaturas, produciendo posiblemente la destrucción parcial de los enlaces que las unen entre sí, existe un mayor movimiento molecular del fluido a consecuencia de la transferencia de calor (Ibarz, 2005; Alvarado, 1996).

En Tabla 8, se presenta la energía de activación (E_a), observando que es inversamente proporcional a la viscosidad cuanto más alto sea la Energía de activación más bajo será la viscosidad. Según los datos calculados para la pulpa de tuna que fluctúan en $6,345 < E_a < 12,532$ (kJ/mol), por lo que el índice de consistencia o viscosidad aparente baja de acuerdo a la temperatura que aumenta, este comportamiento fue observado por Matos (2010) en pulpa de tuna blanca donde la energía de activación encontrado fue de 9,48 a 12,86 kJ/mol, Andrade (2010) en pulpa de zapote encontró la E_a de 23,95 kJ/mol, Dak *et al.*, (2008) en propiedades reológicas de tomate a temperaturas de 20 a 60°C y concentraciones de 8.04 a 18 °Brix con una energía de activación de 8,6 a 14,08 kJ/mol, las cuales son muy similares a los encontrados en la pulpa de tuna variedad amarilla. La energía de activación es un parámetro que proporciona la información sobre la sensibilidad de la viscosidad frente a la variación de la temperatura. (Aguado, 1999).

4.4 Efecto de la concentración sobre el índice de consistencia

El efecto de la concentración fue evaluado considerando el modelo potencial y exponencial (Ecuación 21 y 22), respectivamente), sobre el índice de consistencia a concentraciones 10, 15, 20, 25, y 30 °Brix y a temperaturas de 10, 25, 40, 55 y 70 °C.

Siendo el modelo de la potencial el que mejor describe el comportamiento de la influencia de la concentración sobre el índice de consistencia, al presentar valores de coeficiente de determinación (R^2) altos, tal como se muestran en la Tabla 9, con respecto al modelo exponencial.

Tabla 9. Efecto de la concentración sobre el índice de consistencia

Parámetros	10 °C	25 °C	40 °C	55 °C	70 °C
K_1	6,0527	4,4821	4,0407	3,7926	3,150
A_1	0,4295	0,3052	0,3341	0,238	0,1952
R^2	0,9328	0,9876	0,9654	0,8048	0,673

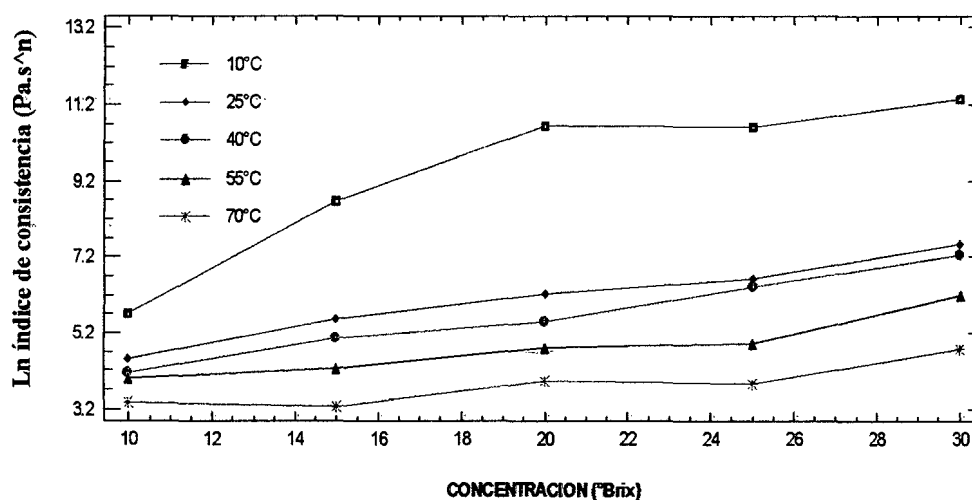


Figura 15. Efecto de la concentración sobre el índice de consistencia

Los resultados coinciden con los estudios realizados por Matos (2010); Dak *et al.*, (2008); Garza y Ibarz (1998), quienes coinciden que el modelo potencial define de la forma satisfactoria el efecto de la concentración ejercida sobre la viscosidad aparente o el índice de consistencia. Al observar que, cuando se concentra la pulpa de tuna, las líneas de flujo se modifican notablemente y la concentración de sólidos interaccionan con otras aumentando aún más la viscosidad de la pulpa de tuna. Si además los sólidos agregados no son esféricos, la pulpa manifiesta un marcado carácter no-newtoniano (pseudoplástico). Si éstos no son rígidos, se deforman con el flujo y la pulpa puede comportarse como un fluido no newtoniano pudiendo presentar además una marcada viscoelasticidad. Siendo un caso típico para las pulpas de frutas y para los polímeros fundidos, el comportamiento se vuelve mucho más complejo y difícil de explicar mediante ecuaciones matemáticas.

La viscosidad de la pulpa de tuna al ser concentrada puede presentar un mayor valor de empaquetamiento (relleno) debido a que las partículas de forma esférica pequeña pueden ocupar los huecos entre las más grandes. Sin embargo, este comportamiento se complica si se tiene en cuenta además el efecto de la velocidad de cizalla, dicho efecto es mayor a velocidades bajas que a altas, donde el tamaño o concentración de sólidos es menor dando una mayor viscosidad. En la Tabla 9 se registran los valores de las constantes de A_1 y K_1 ajustados al modelo de la potencia (Ecuación 21), para las variaciones de concentración tratadas a diferentes temperaturas (Ibarz, 2005; Alvarado, 1996).

En la Figura 15, se puede apreciar que con el aumento de la concentración presenta un aumento el índice de consistencia, siendo similares a los observado por Matos, (2010); Dak *et al.*, (2008); Garza y Ibarz, (1998); Esto debido al incremento de los sólidos, que al ser tan drástico generaron “yield stress” (esfuerzo de corte inicial o umbral de fluencia), cuyo valor aumenta exponencialmente con la concentración de sólidos. Los sólidos con un tamaño pequeño tienden a estar sujetas a fuertes fuerzas de atracción debido a una elevada

superficie y una pequeña distancia entre ellos. Estas fuerzas favorecen la agregación y la formación de estructuras que producen un paulatino aumento de la pseudoplasticidad de la suspensión hasta el punto de producir la aparición de un “yield stress” Una posible explicación de la existencia de un “yield stress” podría ser que los sólidos suspendidos forman una red con fuertes interacciones, que debe ser destruida para que el flujo pueda tener lugar.

El hecho que los sólidos más pequeños son capaces de interaccionar más fácilmente se traduce en el hecho que haga falta una mayor velocidad de cizalla para que se desmorone la estructura y aparezca la zona pseudoplástica. Sin embargo, de igual modo que se puede producir una destrucción de estructuras presentes en la suspensión, algunos autores señalan que el flujo provocado a elevadas es capaz de inducir la formación de cúmulos de sólidos son los responsables de la aparición de una cierta umbral de fluencia o esfuerzo de corte inicial en suspensiones con altas concentraciones de sólidos.

4.5 Efecto combinado de la temperatura y concentración

En la Tabla 10, se observa un análisis de varianza (ANOVA), sobre el efecto de la concentración y temperatura, en modelos Lineales (L) y Cuadráticos (Q), a un nivel de confianza 95% de confianza ($p > 0,05$).

Tabla 10. Análisis de varianza (ANOVA) del efecto de la temperatura y concentración sobre el índice de consistencia

	SC	GL	CM	F ₀	p-value
Concentración(L)	26,58	1	26,58	48,42	0,000001
Concentración(Q)	0,20	1	0,20	0,37	0,550143
Temperatura(L)	76,98	1	76,98	140,25	0,000001
Temperatura(Q)	6,36	1	6,36	11,58	0,002984
Concentración (L) vs					
Temperatura (L)	4,76	1	4,76	8,67	0,008314
Error	10,43	19	0,55		
Total SC	125,30	24			
R ² : 0,92					

La temperatura es el factor que más influye en comparación con la concentración, ya que el índice de consistencia presenta una mayor variación en función a la temperatura.

El análisis estadístico muestra que el coeficiente de determinación R^2 se basa en la suma de cuadrados, que también se denomina suma de cuadrados del error (SC_E) y la suma de cuadrados alrededor de la media conocida como la suma de cuadrados totales (SC_T), la diferencia de estas dos representa la suma de cuadrados debido a la regresión (SRR). La que viene a ser un porcentaje de la suma de cuadrados totales siendo el R^2 que refleja el grado de ajuste del modelo, siendo este de 92% con la que indica que existe una relación cuadrática entre la concentración de sólidos solubles y la temperatura en función al índice de consistencia.

En la Figura 16 y Figura 17, se muestran la gráfica de superficie y diagrama de contornos del índice de consistencia en función a la concentración y temperaturas de la pulpa de tuna, respectivamente.

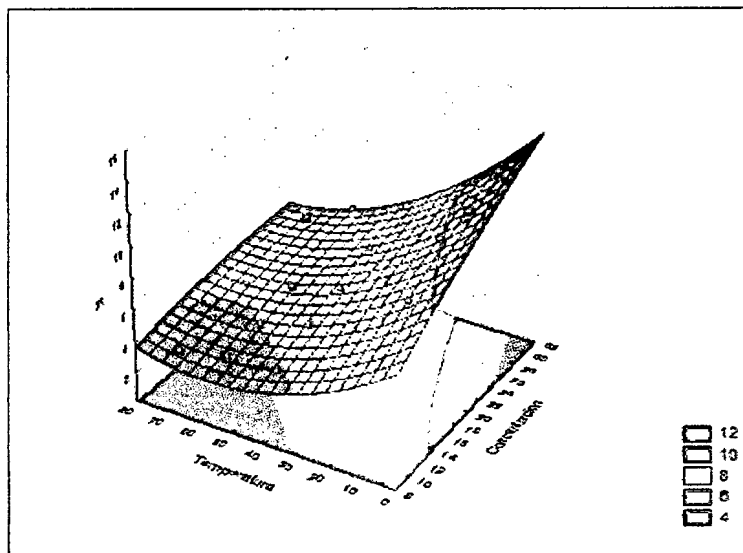


Figura 16. Grafica de superficie del índice de consistencia en función a las variables de concentración y temperatura

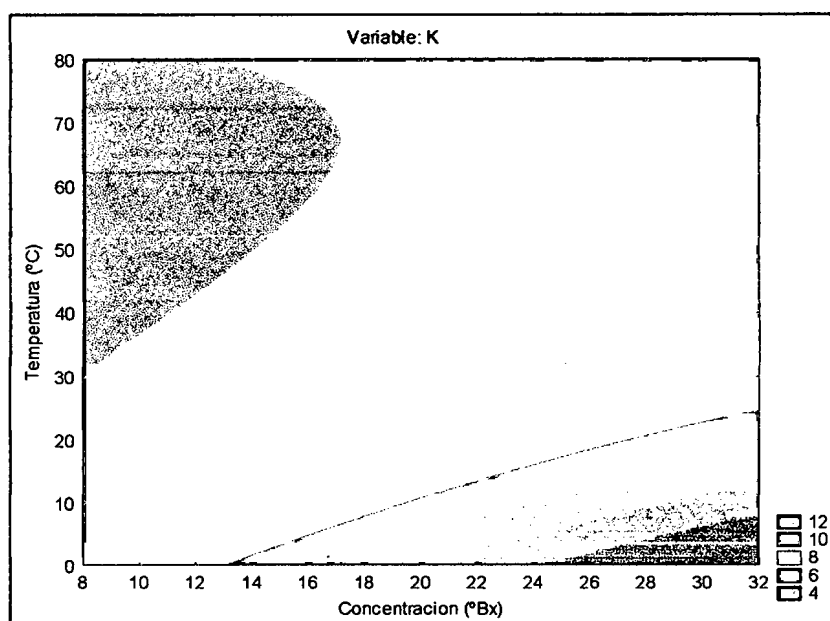


Figura 17. Diagrama de contorno para el índice de consistencia en función de las variaciones de la concentración y temperatura en la pulpa de tuna

Del análisis estadístico se observa que para obtener un índice de consistencia estable se debe de trabajar a concentraciones mayores a 20 °Brix y dentro de rango de temperaturas de 10 a 25 °C. El modelo matemático para determinar el índice de consistencia en función a las variables de concentración y temperatura es:

$$k = 4,814 + 0,348C - 0,002C^2 - 0,132T + 0,001T^2 - 0,003CT \quad R^2 = 0,92$$

Aplicando un análisis de regresión lineal múltiple para evaluar el efecto combinado de la concentración y la temperatura en el índice de consistencia se determinó el siguiente modelo matemático:

$$\ln(k) = -2,8914 + 0,02398C + 1278,7343(1/T_A) \quad R^2 = 0,91$$

En la Figura 19 se puede observar el ajuste del índice de consistencia observada y el índice de consistencia predicha.

En la Figura 18, el diagrama de Pareto, muestra en forma ascendente los efectos de cada una de las variables, así como las interacciones de los factores. En la que se observa que la variable más relevante y de mayor efecto fue la temperatura en la pulpa de tuna viéndose afectado el índice de consistencia en las temperaturas de 10 a 70 °C, afectando en un 11,84% en el modelo matemático lineal, 3,40% para la cuadrática; en cambio en función a la concentración del modelo matemático lineal en 6,96% y la cuadrática no tiene significancia y en función al efecto combinado, no es tan significativo el efecto de un 2,94% en el índice de consistencia de la pulpa de tuna

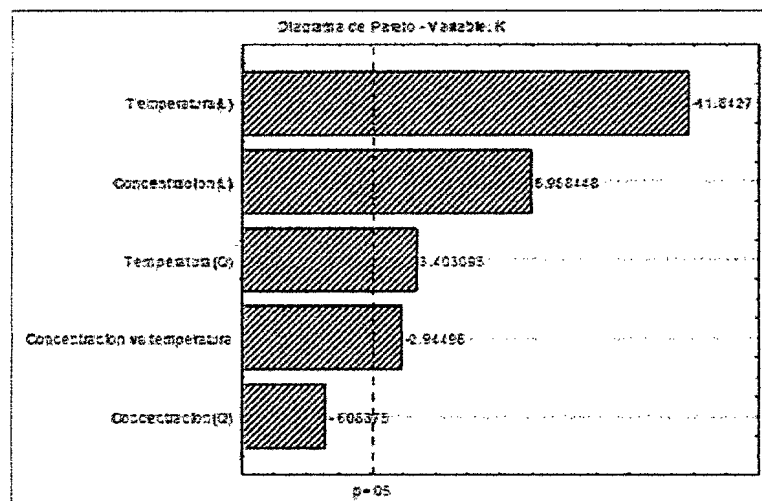


Figura 18. Diagrama de Pareto del efecto de las variables sobre el índice de consistencia

En la figura 19, se aprecia el coeficiente de dispersión de los datos tratados en todo el proceso de evaluación reológica de la pulpa de tuna.

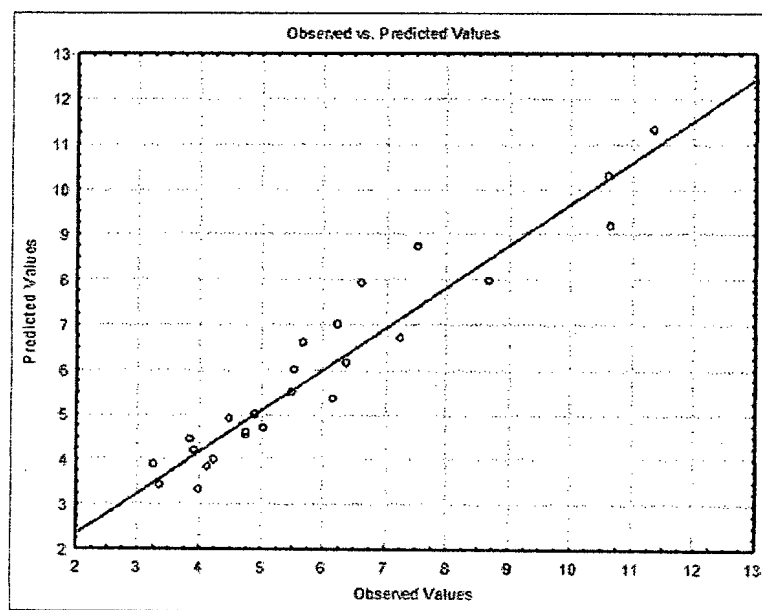


Figura 19. Índice de consistencia observada versus el índice de consistencia predicha

5 CONCLUSIONES

Las propiedades reológicas de la pulpa de frutas, como la tuna, son importantes para su aplicación en los tratamientos térmicos, donde sus propiedades físicas y sus atributos puedan ser vistos alterados con el tipo de tratamientos a las que son sometidos; Por estas razones es la que se estudió las propiedades reológicas de la pulpa de tuna:

- El comportamiento de la pulpa de tuna en los intervalos de temperatura de 10 °C a 70 °C y concentraciones de 10 °Brix a 30 °Brix, mostro las características de un fluido no Newtoniano, perteneciendo a los fluidos pseudoplastico con un esfuerzo de corte inicial, ajustándose adecuadamente al modelo de la Ley de la Potencia, siendo el tratamiento en el que más predomina el comportamiento pseudoplastico a una concentración de 25 ± 5 °Brix a un rango de temperaturas de 10 a 25 °C, mientras que los otros tratamientos también se encuentran dentro de los fluidos pseudoplásticos en las que se observa una variación del comportamiento de pseudoplasticidad al aumentar el índice de flujo.
- Con respecto al efecto de la temperatura sobre el índice consistencia en la pulpa de tuna se ha observado que pierde pseudoplasticidad y se vuelve menos consistente a medida que se incrementa la temperatura y se ve afectado todo sus parámetros reológicos de la pulpa tuna, como la viscosidad y índice de comportamiento, dicho de otro modo que a cuanto más alto sea la temperatura el índice de consistencia o viscosidad aparente será menor en la pulpa estudiada, por otra parte este efecto está muy bien representada por la ecuación de Arrhenius con una energía de activación de $6,345 < E_a < 12,532$ (kJ/mol) la que aumentan a mayor concentración de la pulpa de tuna.
- La concentración influye en cuanto respecta al índice de consistencia (k), en cuanto aumenta la concentración el índice de comportamiento al flujo también incrementa,

pero, en cuanto se sube la temperatura disminuye el índice de comportamiento, y el modelo que mejor describe este comportamiento es el modelo potencial.

- El efecto de la temperatura y concentración tienen un efecto significativo, pero la que mayor significancia tiene es la temperatura siendo ésta el factor predominante y no la concentración sobre el índice de consistencia, vale decir que los mejores tratamientos del índice de consistencia se encuentran entre los factores de temperaturas bajas (debajo de los 20 °C) y concentraciones entre 20 °Brix a 30 °Brix entre estos intervalos el índice de consistencia y viscosidad aparente no se ven afectados tal como muestra los resultados de ANOVA y las gráficas de contorno.

6 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar más estudios en la pulpa de tuna ya que se puede aprovechar este producto en procesos industriales como son las bebidas y otros, más por lo que en los últimos años la tendencia de consumo va incrementando, mientras los cultivos son muy precarios y en la mayoría de los casos crecen como frutos silvestres sin ningún tipo de cuidado.

El estudio en propiedades termo físicas ayudarían a conocer más a profundo sobre los tratamientos térmicos que se puedan aplicar a la pulpa de tuna en un proceso de industrialización.

Los estudios amplios en el procesamiento ayudarían a conocer los distintos tipos de productos que se puedan obtener de esta fruta.

La pulpa de tuna es interesante, por que como pulpa, mantiene sus cualidades de color varios días en contacto con el aire sin llegar a oxidarse, no llega a oxidarse fácilmente.

Por lo que estos estudios ayudarían a complementar los estudios realizados, para luego sin ningún problema se pueda procesar o envasar la tuna ya sea como fruto o pulpa de tuna.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) Abraján M. A. 2008. Efecto del método de extracción en las características químicas y físicas del mucílago del nopal (*Opuntia ficus-indica*) y estudio de su aplicación como recubrimiento comestible. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- 2) Aguado A. J. 1999. Ingeniería de la Industria Alimentaria. Editorial Síntesis. Volumen I. Madrid – España. P. 53-87.
- 3) Andrade R. D. 2010. Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de zapote. Universidad de Córdoba- Colombia. Volumen 33.
- 4) Andrade R.D. 2009. Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de níspero. Revista Facultad Agrícola de Universidad de Córdoba- Colombia. P. 599-612
- 5) Alcázar C. J. 2004. Diccionario técnico de Industrias Alimentarias. Segunda edición. Perú.
- 6) Alvarado J. 1996. Principios de Ingeniería aplicados a los alimentos. Universidad Técnica de Ambato. Ecuador. P. 61-237
- 7) Avalos C. 2009. La tuna fruto de belleza y sabor. Generación ediciones- 94 Biodiversidad – 439.
- 8) Barbosa. G.V. y Peleg M. 1982. Propiedades de Flujo de Alimentos Líquidos y Semilíquidos.
- 9) Da Silva F, Pelegrine D, Gaparetto C. 2005. Reologia do suco de acerola efeitos da concentração e temperatura. Ciencia y Tecnología Alimentaria. P. 121-126.
- 10) Dak M. 2008. Rheological Properties of Tomato Concentrate. International Journal of Food Engineering. Article 11. Volume 4.



- 11) Días R. 2012. Caracterización bromatológica, fisicoquímica, microbiológica y reológica de la pulpa de borojo (*Borojo apatinoi*). Ciencia y tecnología - Colombia. P.17-24
- 12) Garza S. 2002. Caracterización reológica y microbiológica, y cinéticas de deterioro en cremogenado de melocotón. Tesis. Servei de Publicacions Universitat de Lleida. P.1-168
- 13) Garza S. y Ibarz A. 1998. Comportamiento reológico de cremogenado de melocotón. Food Technol., Campinas. P.12-24
- 14) Guan T, Lin H, Ling N, Choong T, L-Razi F. 2008. Effects of Temperatures on Rheological Behavior of Dragon Fruit (*Hylocereus sp.*) Juice. International Journal of Food Engineering.
- 15) Gutiérrez H. 2008. Análisis y diseños de experimentos. México. Editorial McGraw Hill. Segunda edición.
- 16) Hermida J.R. 2000. Fundamentos de ingeniería de procesos Agroalimentarios. España. Coedición, Ediciones Mundi-Prensa. P.201-220
- 17) Horst T. 2001. Fundamentos de tecnología de los alimentos. Zaragoza- España. Segunda edición. Editorial Acribia S.A.P. 135-194
- 18) INEI, 2012. Principales indicadores departamentales 2007-2011. Departamento de Apurímac. Perú.
- 19) Matos A. 2010. Influencia de la temperatura sobre el comportamiento reológico de la pulpa de tuna. Rev. Inv. Ciencia tecnología de alimentos. vol. 1.
- 20) Méndez S. J. y García J. 2006. La tuna: Producción y diversidad. CONABIO. Biodiversitas. N. 68.
- 21) Mott L. Robert, 1996. Mecánica de fluidos aplicada. Editorial Pearson Educación. México. Cuarta edición.

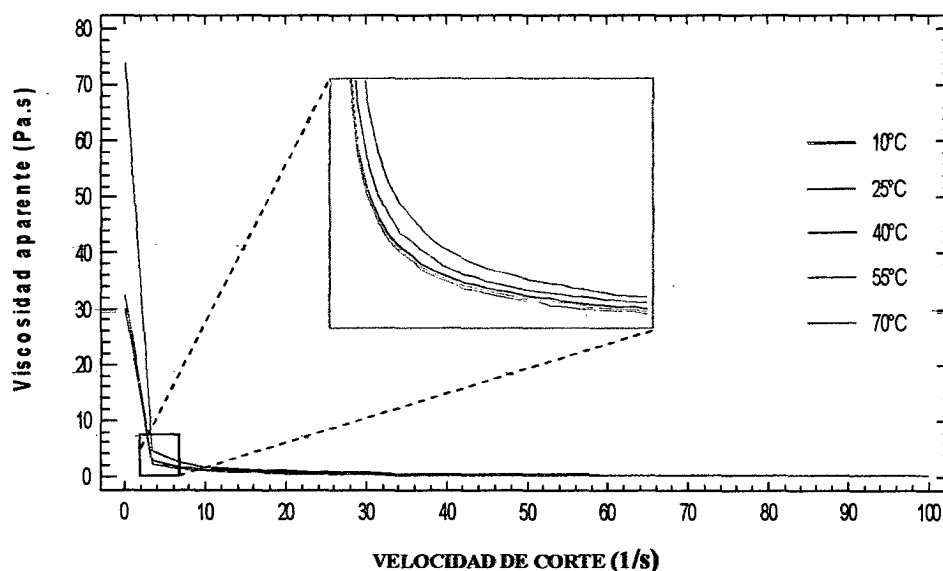


- 22) Muñoz E. 2004. Modelo predictivo del comportamiento reológico de pulpa de pera. Universidad Nacional de Cuyo. Argentina. P.1-8
- 23) Obtención de la pulpa: http://app.ute.edu.ec/content/3460-124-20-1-6-16/Lectura_1_%20SESI%C3%93N60001.pdf. Revisado 29 de agosto del 2013.
- 24) Paúl Singh R., 1998. Introducción a la Ingeniería de los Alimentos. Editorial Acribia S.A. Zaragoza- España. P. 47-80
- 25) Potter M.C. 2004. Termodinámica para ingenieros. Editorial McGraw-Hill interamericana. España.
- 26) Quality Control Instruments, 2001. Instrumentos rotacionales serie ST-2001.
- 27) Ramos A y Ibarz A. 2006. Comportamiento viscoelástico de pulpa de membrillo en función de la concentración de sólidos solubles. Ciênc. Tecnol. Alimentos. Brasil. P. 214-219
- 28) Ríos J. y Quintana M. 2004. Manejo general del cultivo del nopal. Colegio de postgrados de México.
- 29) Sáenz C, 2006. Utilización agroindustrial del nopal. Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO. N. 162.
- 30) Sharma, 2003. Ingeniería de alimentos. Editorial LIMUSA. España. P. 20-67
- 31) Solid Perú, 2008. Conociendo la cadena productiva de la tuna y cochinilla en Ayacucho – Perú.
- 32) Vidal J. M. Sierakowski, C. Haminiuky M. Masson. 2006. Propiedades reológicas da pulpa de manga (*Mangífera indica L. cv. Keitt*) Ciênc. Agrotec. 30 (5): P. 955-960.
- 33) Wkren McCabe L., Julian C. Smith, Harriott P. 1991. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. McGRAW-HILL/Interamericana de España, S.A.U. Cuarta edición.



8 ANEXOS

Anexo 1: Variación de la viscosidad frente a la velocidad de corte a 20°Brix



En el Anexo 1, se graficó la viscosidad frente a velocidad de corte en la que se observa la sensibilidad de la variación de la viscosidad de la pulpa de tuna a 20 °Brix a las distintas temperaturas, descendiéndole inmediatamente al aumentar la velocidad de corte y luego se mantiene casi constante, corroborando el comportamiento pseudoplástico de las muestras de la pulpa de tuna. Además este tipo de comportamiento es típico en la pulpa de frutas, este mismo comportamiento encontró R.D. Andrade, 2010. En la pulpa de zapote.

No se graficó los demás comportamientos de 10, 15, 25 y 30 °Brix porque siguen la misma tendencia.

Anexos 2: Reogramas del comportamiento reológico de la pulpa de tuna

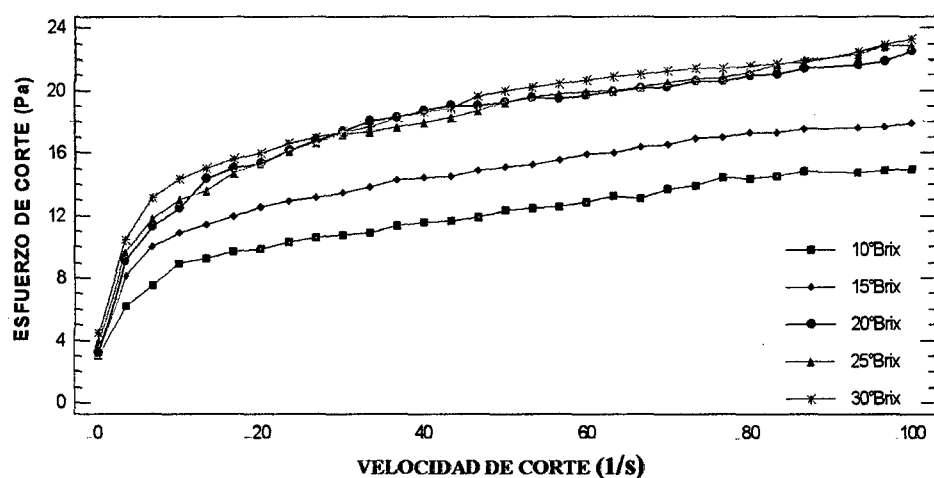


Figura 1. Reograma del comportamiento reológico de la pulpa de tuna en función a la concentración a 25 °C

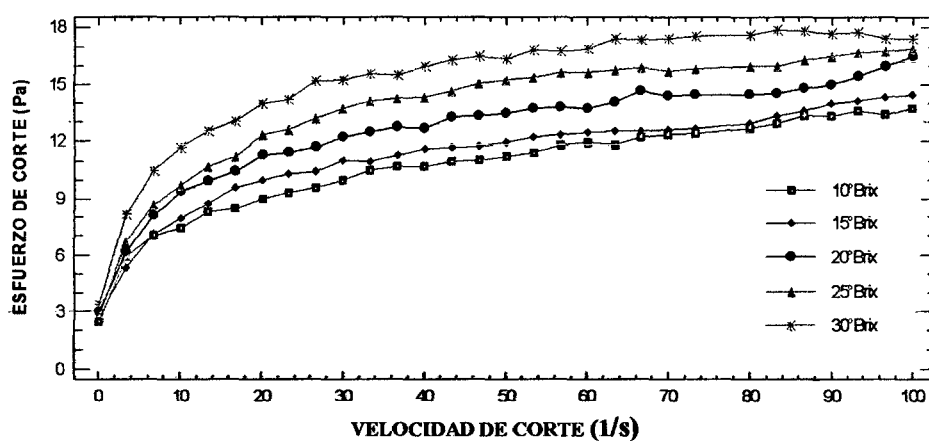


Figura 2. Reograma del comportamiento reológico de la pulpa de tuna en función a la concentración a 55 °C

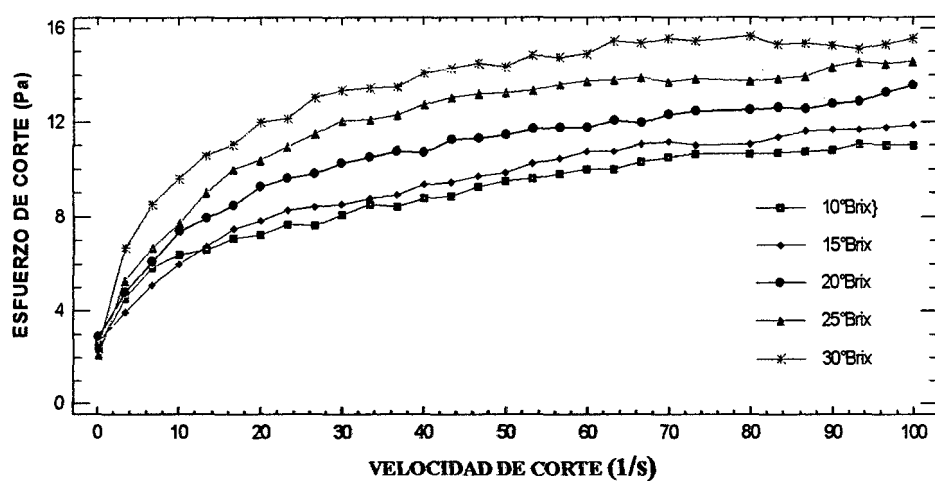


Figura 3. Reograma del comportamiento reológico de la pulpa de tuna en función a la concentración a 70 °C

Anexo 3: Tabla de evaluación de ANOVA al índice de comportamiento al flujo

Concentración	10 °C (a)	25 °C (b)	40 °C (c)	55 °C (d)	70 °C (e)	Promedio n (Yi)	Yi	$\sum_{k=0}^n Y_{ij}^2$
10 (A)	0,321	0,367	0,380	0,314	0,369	0,350	1,751	0,617
15 (B)	0,269	0,365	0,360	0,375	0,401	0,354	1,769	0,636
20 (C)	0,263	0,402	0,373	0,372	0,381	0,358	1,790	0,653
25 (D)	0,265	0,381	0,351	0,397	0,432	0,365	1,825	0,682
30 (E)	0,246	0,345	0,322	0,349	0,392	0,331	1,653	0,558
	1,363	1,858	1,785	1,806	1,975		8,787	3,145

Anexo 3.1. Tabla de determinación de ANOVA para la pseudoplasticidad en función a la concentración y temperatura

Fuente de Variabilidad	gl	Sc	CM	Fc	Valor-P=0.05
Concentración	4	0,003	0,001	1,349	2,87
Temperatura (B)	4	0,043	0,011	17,448	2,87
Error experimental (EE)	16	0,010	0,001		
Total	24	0057			

$$\text{LSD} = 0,0424$$

Anexo 3.2. Tabla de diferencia mínima significativa (LSD) para determinar la pseudoplasticidad en función a la concentración

Diferencia poblacional	Diferencia muestral	Decisión
A - B	$ -0,018 < 0,042$	No significativo
A - C	$ -0,039 < 0,042$	No significativo
A - D	$ -0,074 > 0,042$	Significativo
A - E	$ 0,098 > 0,042$	Significativo
B - C	$ -0,021 < 0,042$	No significativo
B - D	$ -0,056 > 0,042$	Significativo
B - E	$ 0,116 < 0,042$	No significativo
C - D	$ -0,035 < 0,042$	No significativo
C - E	$ 0,137 < 0,042$	No significativo
D - E	$ 0,172 < 0,042$	No significativo

Anexo 3.3. Tabla de diferencia mínima significativa (LSD) para determinar la pseudoplasticidad en función a la a la temperatura

Diferencia poblacional	Diferencia muestral	Decisión
a - b	$ -0,496 > 0,042$	Significativo
a - c	$ -0,423 > 0,042$	Significativo
a - d	$ -0,443 > 0,042$	Significativo
a - e	$ -0,612 > 0,042$	Significativo
b - c	$ 0,073 > 0,042$	Significativo
b - d	$ 0,053 > 0,042$	Significativo
b - e	$ -0,117 > 0,042$	Significativo
c - d	$ -0,021 < 0,042$	No Significativo
c - e	$ -0,190 > 0,042$	Significativo
d - e	$ -0,169 > 0,042$	Significativo

Anexo 4: tipos de viscosímetro rotacional

A. Controlled Stress (CS) Rheometer

Shear stress assigned and strain/strain rate measured.
Searle type sensor systems: Rotor rotates
Can be converted to allow CR-mode

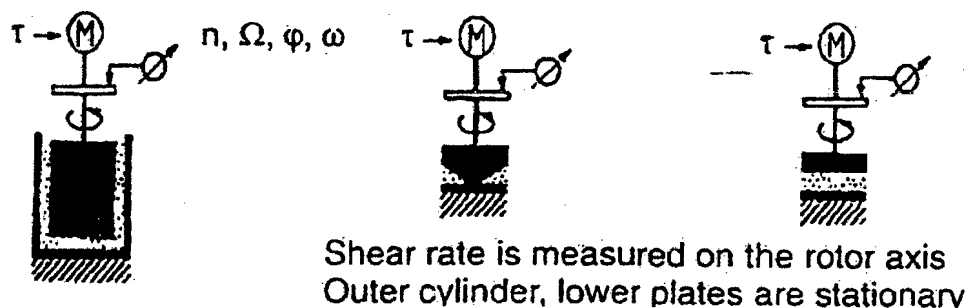


Figura A. Viscosímetro rotacional que controla el esfuerzo de corte

Controlled Rate (CR) Rheometer / Viscometers

Shear rate assigned and shear stress measured.

B1. Searle type sensor systems: Rotor rotates

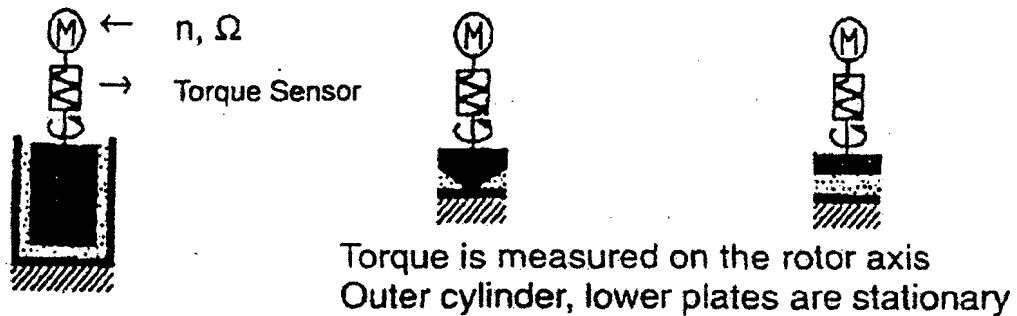


Figura B1. Viscosímetro rotacional donde se controla la velocidad de corte en el rotor

B2. Couette type sensor systems: Outer cylinder or lower plates rotate

Torque is sensed on the inner, non-rotating cylinder or cone

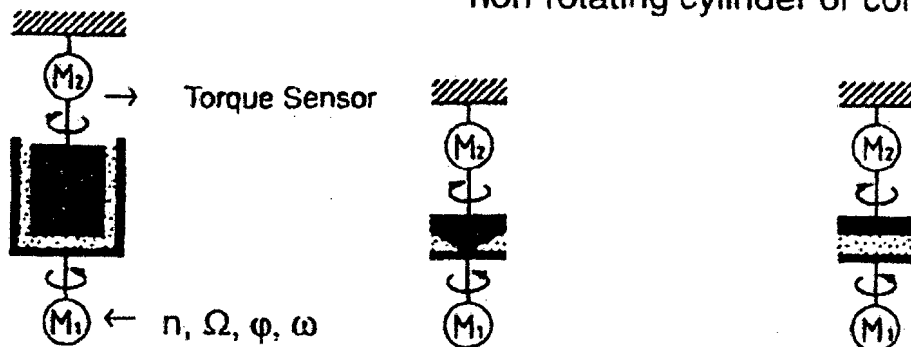


Figura B2. Viscosímetro rotacional donde se controla la velocidad de corte en los huesillos o spindles

Anexo 5. Ensayos oscilatorios de la pulpa de tuna

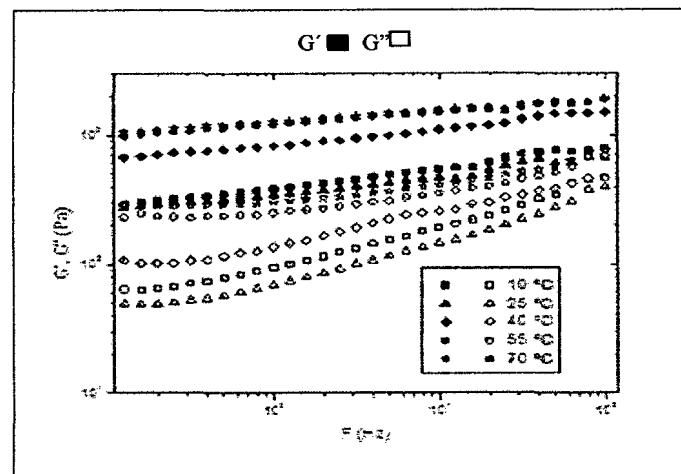


Figura 1: Efecto de la temperatura sobre el módulo de elasticidad (G') y módulo de viscosidad (G'') a 10 °Brix

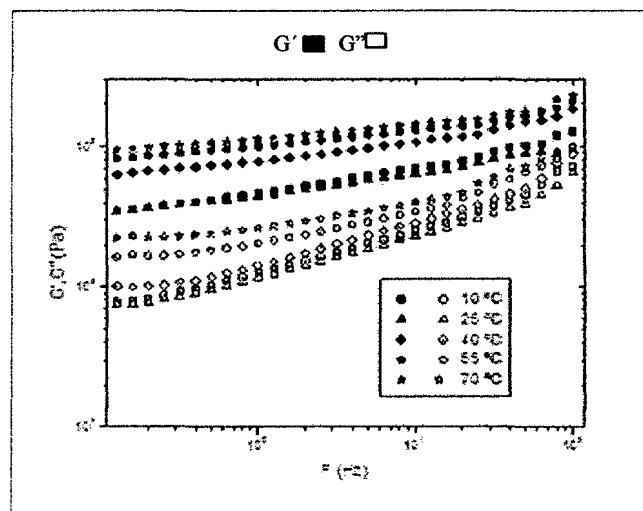


Figura 2: Efecto de la temperatura sobre el módulo de elasticidad (G') y módulo de viscosidad (G'') a 15 °Brix

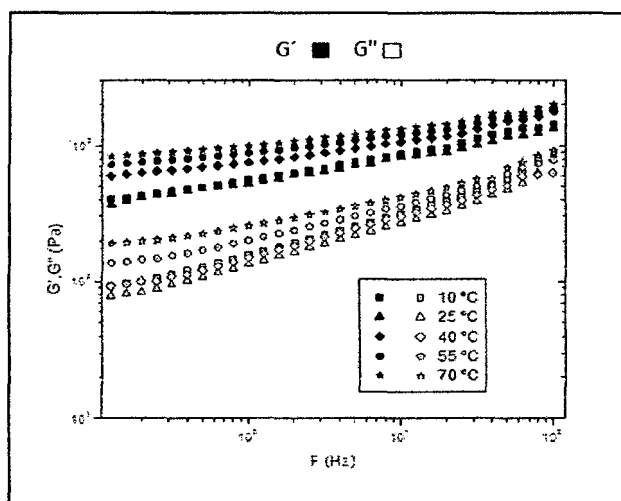


Figura 3: Efecto de la temperatura sobre el módulo de elasticidad (G') y módulo de viscosidad (G'') a 20°Brix

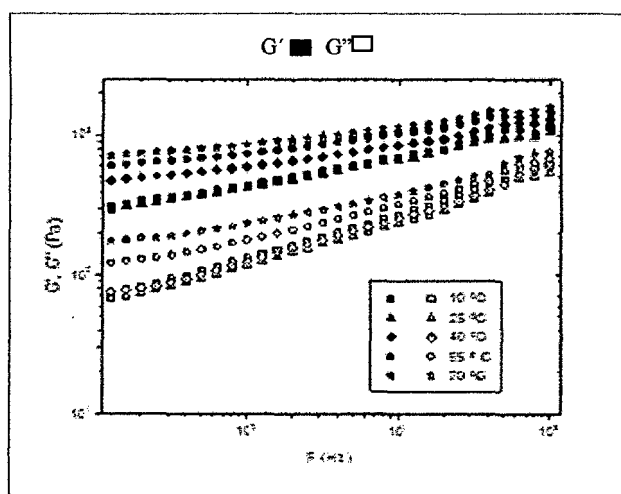


Figura 4: Efecto de la temperatura sobre el módulo de elasticidad (G') y módulo de viscosidad (G'') a 25 °Brix

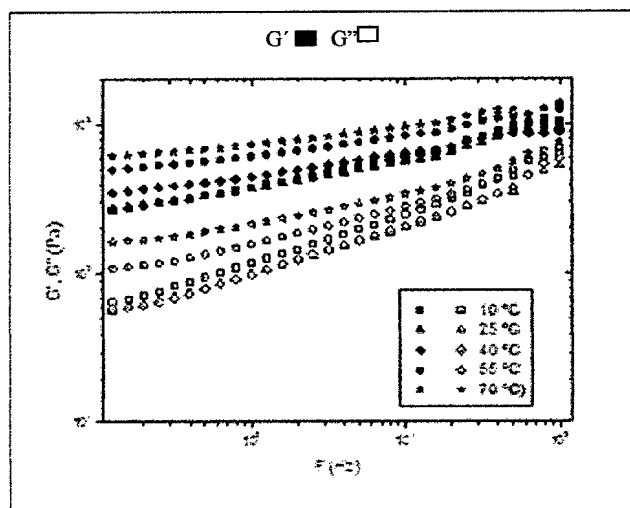
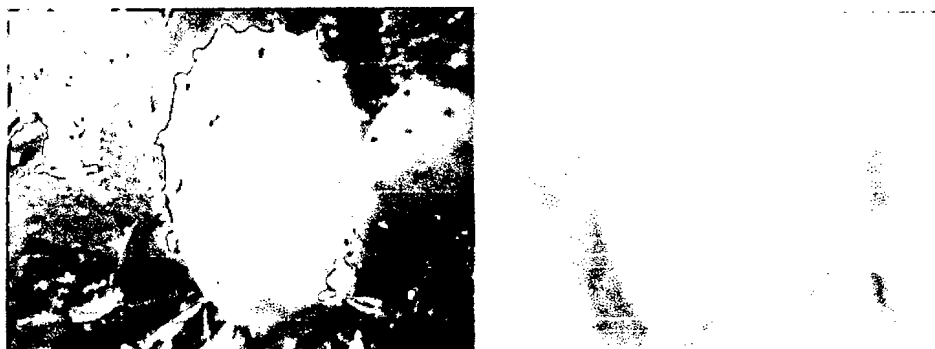


Figura 5: Efecto de la temperatura sobre el módulo de elasticidad (G') y módulo de viscosidad (G'') a 30 °Brix

En el Anexo 5 se muestran las figuras de ensayos oscilatorios que se realizaron a la pulpa de tuna para determinar el comportamiento del módulo de almacenamiento G' (componente elástico) y el módulo de pérdida G'' (componente viscoso) a las distintas temperaturas.

Como se puede observarse en las Figuras 1, 2, 3, 4 y 5 los valores de G' son las que predominan siendo mayores que G'' , en todos los rangos de frecuencia (F (HZ)) presentando un comportamiento elástico por $G' > G''$ teniendo las características de ser más elástico que viscoso, donde ambas funciones aumentan ligeramente con la frecuencia; este mismo comportamiento fue encontrado por Díaz *et al.*, (2012) en el comportamiento reológico de la pulpa de borojo y Ramos y Ibarz, (2006), también encontraron resultados similares en la pulpa de membrillo.

Anexo 6: Imágenes previas a la determinación del comportamiento reológico de la pulpa de tuna.



Imágenes del Fruto de la tuna variedad amarilla



Imágenes de la pulpa de tuna tratados a diferentes concentraciones

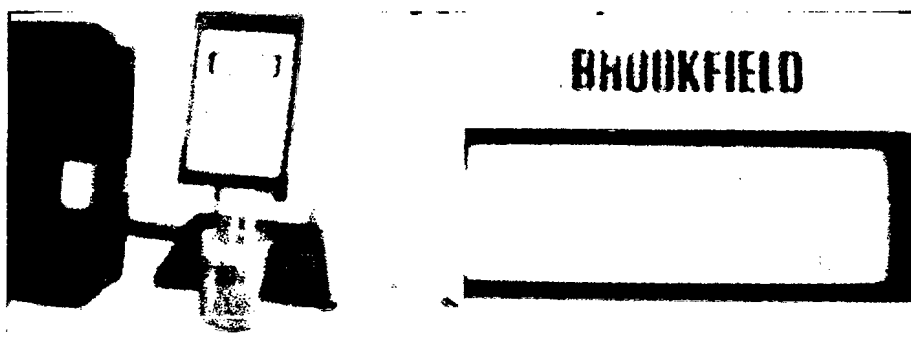


Imagen de equipo de reómetro Brookfield DV-III+



Imagen de componentes del reómetro Brookfield DV-III+, Spindle o husillos