

Universitat de Lleida

Efecto de la adición de fibra y la temperatura sobre las propiedades reológicas de zumos de fruta

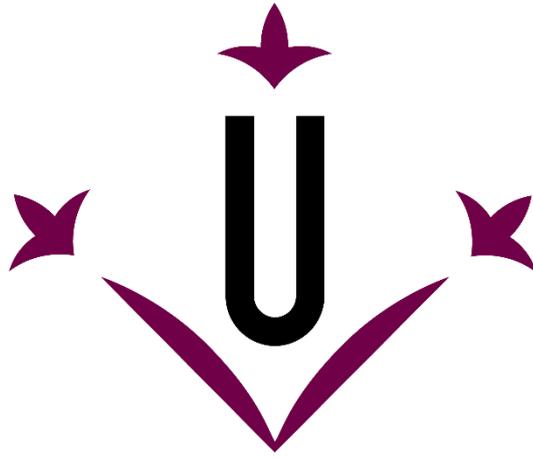
Dorian Salinas Jiménez

<http://hdl.handle.net/10803/673016>



Efecto de la adición de fibra y la temperatura sobre las propiedades reológicas de zumos de fruta està subjecte a una llicència de [Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada 4.0 No adaptada de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

(c) 2021, Dorian Salinas Jiménez



UNIVERSIDAD DE LLEIDA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

EFFECTO DE LA ADICIÓN DE FIBRA Y LA TEMPERATURA SOBRE LAS
PROPIEDADES REOLÓGICAS DE ZUMOS DE FRUTA

TESIS DOCTORAL

Presentada por:

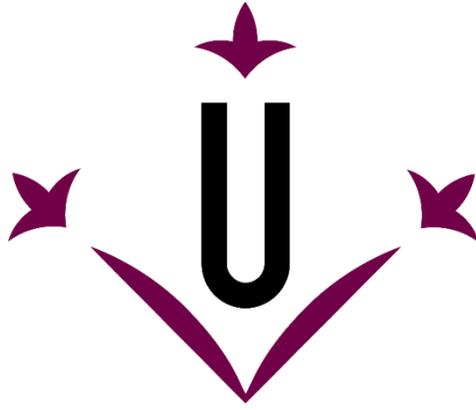
Dorian Salinas Jiménez

Dirigida por:

Albert Ibarz

Alfons Garvín

Lleida, 2021.



UNIVERSIDAD DE LLEIDA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

Tesis Doctoral

Efecto de la adición de fibra y la temperatura sobre las propiedades reológicas de zumos de fruta

Memoria Presentada Por Dorian Salinas Jiménez, para optar al grado de doctor por la universidad de Lleida.

Esta tesis doctoral ha sido realizada en el Departamento de Tecnología de Alimentos de la Universidad de Lleida, siendo dirigida por el Dr. Albert Ibarz Ribas y el Dr. Alfons Garvín Arnés (TECAL-UdL).

El Doctorando

Dorian Salinas Jiménez

El director,
Dr. Albert Ibarz Ribas
Departamento de Tecnología de
Alimentos (Universidad de Lleida)

El director,
Dr. Alfons Garvín Arnés
Departamento de Tecnología de
Alimentos (Universidad de Lleida)

RESUMEN

La industria alimentaria busca permanentemente la innovación en el procesamiento de las frutas y de los productos que se obtienen de ellas para satisfacer a los mercados que cada día se vuelven más exigentes. La fibra dietética se ha convertido en un ingrediente importante en los productos alimentarios que buscan contribuir al mejoramiento de la salud de los consumidores, ya que su consumo regular está asociado con la reducción del riesgo de ciertas enfermedades y la mejora de las funciones gastrointestinales. Adicionalmente, la fibra dietética es utilizada en los alimentos por sus propiedades tecnológicas, ya que provee excelentes características físicas para los productos. Sin embargo, para que pueda ser incluida en ciertos alimentos, la fibra agregada al producto debe de funcionar satisfactoriamente durante la producción y durante su vida útil. La fibra dietética obtenida de frutas, se ha agregado a diferentes productos, siendo la industria de los zumos de fruta un mercado potencial para la incorporación de la misma, sin embargo, la adición de fibra ha provocado alteraciones en las propiedades físicas de los zumos, cambiando la viscosidad de los productos, por lo que es de suma importancia investigar cómo los diferentes contenidos de fibra y los parámetros de temperatura durante los procesos influirán en el cambio de las propiedades físicas y cómo estos cambios afectarán las propiedades del producto final. Por tanto, el principal objetivo de esta investigación fue evaluar la influencia de la temperatura y adición de fibra dietética de manzana, limón, naranja y mandarina en las propiedades reológicas de los zumos de manzana, limón, naranja y mandarina, respectivamente.

Las mediciones reológicas se llevaron a cabo en un reómetro (Haake RS 600, Haake, Alemania), utilizando una geometría Couette (Cilindro concéntrico; Haake Z40-DIN) con relación radio de taza y rotor de 1,0847 (radio rotor = $20 \pm 0,004$ mm). Las mediciones reológicas que presentaron una mayor consistencia viscosa fueron analizadas con la

geometría plato-plato (60 mm de diámetro, Haake PP 60 Ti). En este estudio, se investigó el comportamiento tixotrópico, el comportamiento al flujo, la influencia de la temperatura sobre la viscosidad, el efecto de la concentración sobre la viscosidad, el efecto de la temperatura y la concentración en la viscoelasticidad y la compensación cinética y termodinámica de la adición de fibra en los zumos de manzana, limón, naranja y mandarina.

Los zumos de manzana, limón y naranja a 12,5° Brix mostraron comportamientos tixotrópicos una vez alcanzaron un 10% cf, para el caso de del zumo de mandarina se observó un carácter tixotrópico cuando la muestra superó el 6% de fibra a temperaturas menores de 30°C. En el estudio del comportamiento al flujo, para el caso del zumo de manzana se observó que el zumo siguió el flujo del modelo Newtoniano, Ley de la Potencia y Herschel-Bulkley para los contenidos de fibra de 0 a 8%, de 10 a 12% y 16%, respectivamente. El zumo de limón siguió un flujo del modelo de Newton para los contenidos de 0-12%, un flujo pseudo-plástico a partir de la concentración de 14% a temperaturas menores de 30°C, y un flujo Herschel-Bulkley a partir de la concentración de 20% a temperaturas menores de 45°C. El zumo de naranja siguió un flujo del modelo de Newton para los contenidos de 0-8%, un fluido Ley de la potencia para las concentraciones de 10 a 16% contenido de fibra, y un flujo Herschel-Bulkley a partir de la concentración de 18%. El zumo de mandarina siguió el flujo del modelo Newtoniano para la concentración de 0-4% (45°C), un flujo pseudo-plástico a partir de la concentración de 4% para las temperaturas menores de 30°C y un flujo Herschel-Bulkley para las concentraciones por encima de 6% a partir de las temperaturas de 30°C.

Se encontró que el efecto de la temperatura puede describirse con la ecuación de Arrhenius, que para el caso del zumo de manzana, limón y naranja se muestran dos líneas de compensación, una para las muestras con un contenido de fibra hasta el 8% (manzana),

16% (limón), 8% (naranja) que siguieron el modelo de Newton, y otro para los zumos que contienen más del 10% (manzana), 18% (limón), 10% (naranja) de fibra que siguieron los modelos no newtonianos y una línea recta para el zumo de mandarina de 2 a 10% contenido de fibra. Se encontró que la compensación para los zumos no newtonianos era real, concluyendo que el contenido de fibra influyó significativamente en el coeficiente de consistencia y eso no cambió el mecanismo de flujo para este intervalo de valores (10-16% manzana y naranja, 16-22% limón), cuyo control fue entrópico a las temperaturas de trabajo.

Las propiedades viscoelásticas de un zumo de manzana (14 y 16%), limón (18, 20, 22%), naranja (16 y 18%) y mandarina (8 y 10%) de fibra añadida se evaluaron a partir de mediciones dinámicas a temperaturas de 5, 15, 30, 45 y 60 °C. Todos los zumos con fibra agregada estudiados en todos los porcentajes citados exhibieron un comportamiento viscoelástico, mostrando una G' mayor que G'' en todos los valores de frecuencia. La temperatura tuvo un efecto significativo en las propiedades reológicas dinámicas de todas las muestras, disminuyendo las magnitudes de G' y G'' a medida que aumentaba la temperatura para todos los casos.

RESUM

La indústria alimentària cerca permanentment la innovació en el processament de les fruites i dels productes que s'obtenen d'elles per a satisfer als mercats que cada dia es tornen més exigents. La fibra dietètica s'ha convertit en un ingredient important en els productes alimentaris que busquen contribuir al millorament de la salut dels consumidors, ja que el seu consum regular està associat amb la reducció del risc d'unes certes malalties i la millora de les funcions gastrointestinals. Addicionalment, la fibra dietètica és utilitzada en els aliments per les seves propietats tecnològiques, ja que proveeix excel·lents característiques físiques per als productes. No obstant això, perquè pugui ser inclosa en uns certs aliments, la fibra agregada al producte ha de funcionar satisfactòriament durant la producció i durant la seva vida útil. La fibra dietètica obtinguda de fruites, s'ha agregat a diferents productes, sent la indústria dels suc de fruita un mercat potencial per a la incorporació d'aquesta, no obstant això, l'addició de fibra ha provocat alteracions en les propietats físiques dels suc, canviant la viscositat dels productes, per la qual cosa és de summa importància investigar com els diferents continguts de fibra i els paràmetres de temperatura durant els processos influiran en el canvi de les propietats físiques i com aquests canvis afectaran les propietats del producte final. Per tant, el principal objectiu d'aquesta recerca va ser avaluar la influència de la temperatura i addició de fibra dietètica de poma, llimona, taronja i mandarina en les propietats reològiques dels suc de poma, llimona, taronja i mandarina, respectivament.

Les mesures reològiques es van dur a terme en un reòmetre (Haake RS 600, Haake, Alemanya), utilitzant una geometria Couette (Cilindre concèntric; Haake Z40-ZIN) amb relació radio de copa i rotor de 1,0847 (radio rotor = $20 \pm 0,004$ mm). Les mesures reològiques que van presentar una major consistència viscosa van ser analitzades amb la geometria plat-plat (60 mm de diàmetre, Haake PP 60 Tu). En aquest estudi, es va

investigar el comportament tixotròpic, el comportament al flux, la influència de la temperatura sobre la viscositat, l'efecte de la concentració sobre la viscositat, l'efecte de la temperatura i la concentració en la viscoelasticitat i la compensació cinètica i termodinàmica de l'addició de fibra en els suc de poma, llimona, taronja i mandarina.

Els suc de poma, llimona i taronja a 12,5°Brix van mostrar comportaments tixòtrops una vegada van aconseguir un 10% cf, per al cas del suc de mandarina es va observar un caràcter tixotròpic quan la mostra va superar el 6% de fibra a temperatures menors de 30 °C. En l'estudi del comportament al flux, per al cas del suc de poma es va observar que el suc va seguir el flux del model Newtonià, Llei de la Potència i Herschel-Bulkley per als continguts de fibra de 0 a 8%, de 10 a 12% i 16%, respectivament. El suc de llimona va seguir un flux del model de Newton per als continguts de 0-12%, un flux pseudo-plàstic a partir de la concentració de 14% a temperatures menors de 30 °C, i un flux Herschel-Bulkley a partir de la concentració de 20% a temperatures menors de 45 °C. El suc de taronja va seguir un flux del model de Newton per als continguts de 0-8%, un fluid Llei de la potència per a les concentracions de 10 a 16% contingut de fibra, i un flux Herschel-Bulkley a partir de la concentració de 18%. El suc de mandarina va seguir el flux del model Newtonià per a la concentració de 0-4% (45 °C), un flux pseudo-plàstic a partir de la concentració de 4% per a les temperatures menors de 30 °C i un flux Herschel-Bulkley per a les concentracions per sobre de 6% a partir de les temperatures de 30 °C.

Es va trobar que l'efecte de la temperatura pot descriure's amb l'equació de Arrhenius, que per al cas del suc de poma, llimona i taronja es mostren dues línies de compensació, una per a les mostres amb un contingut de fibra fins al 8% (poma), 16% (llimona), 8% (taronja) que van seguir el model de Newton, i un altre per als suc que contenen més del 10% (poma), 18% (llimona), 10% (taronja) de fibra que van seguir els models no newtonians i una línia recta per al suc de mandarina de 2 a 10% contingut de

fibra. Es va trobar que la compensació per als sucus no newtonians era real, conclouent que el contingut de fibra va influir significativament en el coeficient de consistència i això no va canviar el mecanisme de flux per a aquest interval de valors (10-16% poma i taronja, 16-22% llimona), el control de la qual va ser entròpic a les temperatures de treball. Les propietats viscoelàstiques d'un suc de poma (14 i 16%), llimona (18, 20, 22%), taronja (16 i 18%) i mandarina (8 i 10%) de fibra afegida es van avaluar a partir de mesuraments dinàmics a temperatures de 5, 15, 30, 45 i 60 °C. Tots els sucus amb fibra agregada estudiats en tots els percentatges citats van exhibir un comportament viscoelàstic, mostrant una G' major que G'' en tots els valors de freqüència. La temperatura va tenir un efecte significatiu en les propietats reològiques dinàmiques de totes mostres, disminuint les magnituds de G' i G'' a mesura que augmentava la temperatura per a tots els casos.

ABSTRACT

The food industry is constantly seeking innovation in fruit processing and in the products obtained from them, in order to satisfy the markets that are becoming more demanding every day. Dietary fiber has become an important ingredient in food products that seek to contribute to the improvement of consumers' health since its regular consumption is associated with the reduction of the risk of certain diseases and the improvement of gastrointestinal functions. Additionally, dietary fiber is used in foods for its technological properties, as it provides excellent physical characteristics for products.

However, in order to be included in certain foods, the fiber added to the product must function satisfactorily during production and during its shelf life. Dietary fiber obtained from fruits has been added to different products, being the fruit juice industry a potential market for the incorporation of the same, however, the addition of fiber causes alterations in the physical properties of the juices, changing the viscosity of the products, so it is of utmost importance to investigate how different fiber contents and temperature parameters during the processes will influence the change in physical properties and how these changes will affect the properties of the final product. Therefore, the main objective of this research was to evaluate the influence of temperature and addition of apple, lemon, orange, and tangerine dietary fiber on the rheological properties of apple, lemon, orange, and tangerine juices, respectively.

Rheological measurements were carried out in a rheometer (Haake RS 600, Haake, Germany), using a Couette geometry (concentric cylinder; Haake Z40-DIN) with a cup-rotor radius ratio of 1.0847 (rotor radius = 20 ± 0.004 mm). Rheological measurements that exhibited higher viscous consistency were analyzed with the dish-plate geometry (60 mm diameter, Haake PP 60 Ti). In this study, thixotropic behavior, flow behavior, the influence of temperature on viscosity, the effect of concentration on viscosity, the effect

of temperature and concentration on viscoelasticity, and the kinetic and thermodynamic compensation of fiber addition in apple, lemon, orange, and tangerine juices were investigated.

Apple, lemon, and orange juices at 12.5° Brix showed thixotropic behavior once they reached 10% cf; in the case of mandarin juice, a thixotropic behavior was observed when the sample exceeded 6% fiber content at temperatures below 30°C. In the study of flow behavior, in the case of apple juice, it was observed that the juice followed the flow of the Newtonian model, Power Law, and Herschel-Bulkley for fiber contents of 0 to 8%, 10 to 12%, and 16%, respectively. Lemon juice followed Newtonian model flow for contents from 0-12%, pseudo-plastic flow from the 14% concentration at temperatures below 30°C, and Herschel-Bulkley flow from the 20% concentration at temperatures below 45°C. Orange juice followed a Newton model flow for contents from 0-8%, a Power Law fluid for concentrations from 10 to 16% fiber content, and a Herschel-Bulkley flow from the 18% concentration. Mandarin juice followed the Newtonian model flow for the 0-4% concentration (45°C), a pseudo-plastic flow from the 4% concentration for temperatures below 30°C, and a Herschel-Bulkley flow for concentrations above 6% from temperatures of 30°C.

It was found that the effect of temperature can be described by the Arrhenius equation, which for the case of apple, lemon, and orange juice shows two compensation lines, one for samples with fiber content up to 8% (apple), 16% (lemon), 8% (orange) which followed the Newtonian model, and another for juices containing more than 10% (apple), 18% (lemon), 10% (orange) fiber which followed the non-Newtonian models and a straight line for tangerine juice from 2 to 10% fiber content. The compensation for the non-Newtonian juices was found to be real, concluding that the fiber content significantly influenced the consistency coefficient and that did not change the flow mechanism for this

range of values (10-16% apple and orange, 16-22% lemon), the control of which was entropic at the working temperatures.

The viscoelastic properties of an apple (14 and 16%), lemon (18, 20, 22%), orange (16 and 18%), and tangerine (8 and 10%) juice with added fiber were evaluated from dynamic measurements at temperatures of 5, 15, 30, 30, 45 and 60 °C. All the juices with added fiber studied at all the above percentages exhibited viscoelastic behavior, showing a G' greater than G'' at all frequency values. The temperature had a significant effect on the dynamic rheological properties of all samples, with the magnitudes of G' and G'' decreasing as temperature increased for all cases.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	3
RESUM.....	6
ABSTRACT.....	9
TABLA DE CONTENIDO.....	12
ÍNDICE DE FIGURAS.....	16
ÍNDICE DE TABLAS	20
CAPÍTULO 1.....	22
INTRODUCCIÓN	22
1.1 Concepto básico de la fibra dietética.....	23
1.1.1 Definición	23
1.1.2 Composición de la fibra dietética	24
1.1.3 Beneficios de la fibra dietética para la salud	27
1.1.4 Fuentes de fibra dietética	31
1.1.5 Aplicaciones de fibra.....	32
1.1.6 Extracción de fibra dietética	33
1.1.7 Alimentos con fibra añadida	35
1.1.8 Influencia de la adición de fibra en el comportamiento reológico.....	36
1.2 Zumos de frutas	38
1.2.1 Concepto zumos de frutas	38
1.2.2 Consumo de zumos	39
1.2.3 Clasificación de Zumos.....	41
1.3 Propiedades reológicas de los alimentos	41
1.3.1 Principio básico	41
1.3.2 Aplicación de la reología a la industria alimentaria	42
1.3.3 Viscosidad	43
1.4 Caracterización reológica de los zumos de frutas con fibra añadida	46
1.4.1 Tixotropía del zumo con fibra añadida.....	47
1.4.2 Efecto del tiempo en la viscosidad	48
1.4.3 Efecto de la temperatura en la viscosidad	48
1.4.4 Viscoelasticidad	49
1.4.5 Compensación cinética y termodinámica	49
CAPÍTULO 2.....	51
OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO.....	51

2.1	Objetivos y Plan de Trabajo	52
2.1.1	Justificación e interés de la tesis doctoral	52
2.2.	Objetivos	53
2.2.1	Objetivo principal	53
2.2.2	Objetivos específicos	53
2.3	Plan de Trabajo.....	54
CAPÍTULO 3.....		57
MATERIALES Y MÉTODOS		57
3.1	Materiales y Métodos	58
3.1.1	Materias Primas	58
3.1.2	Fibra de Manzana	58
3.1.3	Fibra de Limón.....	59
3.1.4	Fibra de Naranja.....	59
3.1.5	Fibra de Mandarina.....	59
3.2	Caracterización tixotrópica	60
3.3	Caracterización del comportamiento reológico al flujo	61
3.4	Caracterización viscoelástica	63
CAPÍTULO 4.....		65
MODELOS MATEMÁTICOS		65
4.1	Modelos matemáticos.....	66
4.1.1	Comportamiento tixotrópico.....	66
4.1.2	Comportamiento al flujo	67
4.1.3	Influencia de la temperatura sobre la viscosidad.....	68
4.1.4	Efecto de la concentración en la viscosidad	69
4.1.5	Efecto de la temperatura y porcentaje de fibra sobre la viscoelasticidad.....	69
4.1.6	Compensación cinética	70
CAPÍTULO 5.....		72
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		72
5.1.1	Efecto de la concentración de fibra sobre la tixotropía en el zumo de manzana.....	73
5.1.3	Efecto de la temperatura sobre la tixotropía del zumo de manzana	75
5.1.4	Comportamiento al flujo zumo de manzana con fibra	79
5.1.5	Efecto de la temperatura sobre el comportamiento al flujo	86
5.1.6	Efecto de la concentración sobre el comportamiento al flujo	88

5.1.7 Compensación Cinética	89
5.1.8 Caracterización de la viscoelasticidad del zumo de manzana con fibra añadida	93
5.2 Caracterización Reológica del zumo de limón con fibra añadida	98
5.2.1 Tixotropía del zumo de limón con fibra añadida	98
5.2.2 Efecto de la concentración de fibra sobre la tixotropía en el zumo de limón	98
5.2.3 Efecto de la temperatura de fibra sobre la tixotropía en el zumo de limón	101
5.2.4 Comportamiento al flujo zumo de limón con fibra	104
5.2.5 Efecto de la temperatura sobre el comportamiento al flujo	113
5.2.6 Efecto de la concentración sobre el comportamiento al flujo	114
5.2.7 Compensación Cinética	115
5.2.8 Caracterización de la viscoelasticidad del zumo de limón con fibra añadida	119
5.3 Caracterización Reológica del zumo de naranja con fibra añadida	124
5.3.1 Tixotropía del zumo de naranja con fibra añadida	124
5.3.2 Efecto de la concentración de fibra sobre la tixotropía en el zumo de naranja	125
5.3.3 Efecto de la temperatura sobre la tixotropía del zumo de naranja ...	127
5.3.4 Comportamiento al flujo zumo de naranja con fibra	131
5.3.5 Efecto de la temperatura sobre el comportamiento al flujo	138
5.3.6 Efecto de la concentración sobre el comportamiento al flujo	140
5.3.7 Compensación Cinética	141
5.3.8 Caracterización de la viscoelasticidad del zumo de naranja con fibra añadida	144
5.4 Caracterización Reológica del zumo de mandarina con fibra añadida	148
5.4.1 Tixotropía del zumo de mandarina con fibra añadida	148
5.4.2 Efecto de la concentración de fibra sobre la tixotropía	149
5.4.3 Efecto de la temperatura sobre la tixotropía del zumo de mandarina	151
5.4.4 Comportamiento al flujo zumo de mandarina con fibra	153
5.4.5 Efecto de la temperatura sobre el comportamiento al flujo	158
5.4.6 Efecto de la concentración sobre el comportamiento al flujo	159
5.4.7 Compensación Cinética	160
5.4.8 Caracterización de la viscoelasticidad del zumo de mandarina con fibra añadida	162

CAPÍTULO 6	168
CONCLUSIONES	168
6 Referencias	172

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Unidad estructural básica de la celulosa (Aspinall, 1982).	25
Figura 2. Estructura de la hemicelulosa (Kulkarni <i>et al.</i> , 2012).	25
Figura 3. Estructura primaria de la goma xantana (Wang y Wang, 2013).	27
Figura 4. Flujo viscoso (Barbosa-Cánovas <i>et al.</i> , 1993).	43
Figura 5. Reogramas para fluidos independientes del tiempo (Barbosa <i>et al.</i> , 1993).	45
Figura 6. Variación del esfuerzo cortante con el tiempo para el zumo de manzana de 0 a 8 % de fibra a diferentes temperaturas. Modelo Fighoni Shoemaker.	77
.....	78
Figura 7. Variación del esfuerzo cortante con el tiempo para el zumo de manzana de 10 a 16% de fibra a diferentes temperaturas.	78
Figura 8. Reogramas para zumo de manzana a concentración de 0% de fibra a todas las temperaturas.	79
Figura 9. Reograma para zumo de manzana a concentración de 2% de fibra a todas las temperaturas.	80
Figura 10. Reograma para zumo de manzana a concentración de 4% de fibra a todas las temperaturas.	80
Figura 11. Reograma para zumo de manzana a concentración de 6% de fibra a todas las temperaturas.	80
Figura 12. Reograma para zumo de manzana a concentración de 8% de fibra a todas las temperaturas.	81
Figura 13. Reograma para zumo de manzana a concentración de 10% de fibra a todas las temperaturas.	82
Figura 14. Reograma para zumo de manzana a concentración de 12% de fibra a todas las temperaturas.	82
Figura 15. Reograma para zumo de manzana a concentración de 14% de fibra a todas las temperaturas.	82
Figura 16. Reograma para zumo de manzana a concentración de 16% de fibra a todas las temperaturas.	83
Figura 17. Compensación cinética zumo de manzana con fibra añadida.	90
Figura 18. Tendencia de la viscosidad al punto de iso-consistencia para los contenidos de fibra relacionados con el modelo de Newton (<8%).	92
Figura 19. Tendencia del índice de consistencia al punto de iso-consistencia para los contenidos de fibra relacionados con los modelos No-Newtonianos (10-16%).	92
Figura 20. G' G'' y viscosidad compleja obtenida del barrido de frecuencia (0,01 a 10 Hz) para un esfuerzo cortante de 1 Pa. 18%, 16%, 14% y 12% contenido de fibra a 5 °C, 15 °C, 30 °C, 45 °C y 60 °C.	96
Figura 21. Variación del esfuerzo cortante con el tiempo para el zumo de limón de 0 a 8 % de fibra a diferentes temperaturas. Modelo Fighoni Shoemaker.	103

Figura 22. Variación del esfuerzo cortante con el tiempo para el zumo de limón de 10 a 22 % de fibra a diferentes temperaturas. Modelo Figoni Shoemaker.....	104
Figura 23. Reograma para zumo de limón a concentración de 0% de fibra a todas las temperaturas.....	105
Figura 24. Reograma para zumo de limón a concentración de 2% de fibra a todas las temperaturas.....	106
Figura 25. Reograma para zumo de limón a concentración de 4% de fibra a todas las temperaturas.....	106
Figura 26. Reograma para zumo de limón a concentración de 6% de fibra a todas las temperaturas.....	107
Figura 27. Reograma para zumo de limón a concentración de 8% de fibra a todas las temperaturas.....	107
Figura 28. Reograma para zumo de limón a concentración de 10% de fibra a todas las temperaturas.....	107
Figura 29. Reograma para zumo de limón a concentración de 12% de fibra a todas las temperaturas.....	108
Figura 30. Reograma para zumo de limón a concentración de 14% de fibra a todas las temperaturas.....	109
Figura 31. Reograma para zumo de limón a concentración de 16% de fibra a todas las temperaturas.....	109
Figura 32. Reograma para zumo de limón a concentración de 18% de fibra a todas las temperaturas.....	110
Figura 33. Reograma para zumo de limón a concentración de 20% de fibra a todas las temperaturas.....	110
Figura 34. Reograma para zumo de limón a concentración de 22% de fibra a todas las temperaturas.....	110
Figura 35. Compensación cinética zumo de limón con fibra añadida	116
Figura 36. Tendencia de la viscosidad al punto iso-consistencia para los contenidos de fibra de 2% a 16%	118
Figura 37. Tendencia de la viscosidad al punto iso-consistencia para los contenidos de fibra de 18% a 22%	119
Figura 38. G' G'' y viscosidad compleja obtenida del barrido de frecuencia (0,01 a 10 Hz) para un esfuerzo cortante de 1 Pa. 22%, 20%, y 18% contenido de fibra a 5 °C, 15 °C, 30 °C, 45 °C y 60 °C.	122
Figura 39. Variación del esfuerzo cortante con el tiempo para el zumo de naranja de 0 a 8 % de fibra a diferentes temperaturas. Modelo Figoni Shoemaker.....	129
Figura 40. Variación del esfuerzo cortante con el tiempo para el zumo de naranja de 10 a 18 % de fibra a diferentes temperaturas. Modelo Figoni Shoemaker.....	130
Figura 41. Reograma para zumo de naranja a concentración de 0% de fibra a todas las temperaturas.....	132

Figura 42. Reograma para zumo de naranja a concentración de 2% de fibra a todas las temperaturas.....	132
Figura 43. Reograma para zumo de naranja a concentración de 4% de fibra a todas las temperaturas.....	133
Figura 44. Reograma para zumo de naranja a concentración de 6% de fibra a todas las temperaturas.....	133
Figura 45. Reograma para zumo de naranja a concentración de 8% de fibra a todas las temperaturas.....	134
Figura 46. Reograma para zumo de naranja a concentración de 10% de fibra a todas las temperaturas.....	134
Figura 47. Reograma para zumo de naranja a concentración de 12% de fibra a todas las temperaturas.....	135
Figura 48. Reograma para zumo de naranja a concentración de 14% de fibra a todas las temperaturas.....	135
Figura 49. Reograma para zumo de naranja a concentración de 16% de fibra a todas las temperaturas.....	135
Figura 50. Reograma para zumo de naranja a concentración de 18% de fibra a todas las temperaturas.....	136
Figura 51. Compensación cinética zumo de naranja con fibra añadida.....	141
Figura 52. Tendencia de la viscosidad al punto de iso-consistencia para los contenidos de fibra relacionados con el modelo de Newton (<8).....	143
Figura 53. Tendencia del índice de consistencia al punto de iso-consistencia para los contenidos de fibra relacionados con los modelos No-Newtonianos (10-18%)......	144
Figura 54. G' y viscosidad compleja obtenida del barrido de frecuencia (0,01 a 10 Hz) para un esfuerzo cortante de 1 Pa. 18% y 16% contenido de fibra a 5 °C, 15 °C, 30 °C, 45 °C y 60 °C.....	147
Figura 55. Variación del esfuerzo cortante con el tiempo para el zumo de naranja de 0 a 10 % de fibra a diferentes temperaturas. Modelo Fignon Shoemaker.....	153
Figura 56. Reograma para zumo de mandarina a concentración de 0% de fibra a todas las temperaturas.	154
Figura 57. Reograma para zumo de mandarina a concentración de 2% de fibra a todas las temperaturas.	154
Figura 58. Reograma para zumo de mandarina a concentración de 4% de fibra a todas las temperaturas.	154
Figura 59. Reograma para zumo de mandarina a concentración de 6% de fibra a todas las temperaturas.	155
Figura 60. Reograma para zumo de mandarina a concentración de 8% de fibra a todas las temperaturas.	155
Figura 61. Reograma para zumo de mandarina a concentración de 10% de fibra a todas las temperaturas.	155

Figura 62. Compensación cinética zumo de mandarina con fibra añadida.....	161
Figura 63. Tendencia de la viscosidad al punto de iso-consistencia para todos los contenidos de fibra.....	162
Figura 64. G' G'' viscosidad compleja obtenida del barrido de frecuencia (0,01 a 10 Hz) para un esfuerzo cortante de 1 Pa. 10% y 16% contenido de fibra a 5 °C, 15 °C, 30 °C, 45 °C y 60 °C.....	165

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de la fibra y su relación con efectos fisiológicos (Grigelmo, 1997).....	29
Tabla 2. Geometría utilizada para los estudios	62
Tabla 3. Valores de los parámetros reológicos del Modelo Figoni-Shoemaker en función del porcentaje de fibra y temperatura a una velocidad de cizalla de 100 s^{-1}	74
Tabla 4. Valores para los parámetros del modelo Herschel-Bulkley ($0.1 \text{ s}^{-1} < \dot{\gamma} < 300 \text{ s}^{-1}$, con promedio de tres replicas \pm desviación standard).	84
Tabla 5. Parámetros de la ecuación Arrhenius para el zumo de manzana.....	87
Tabla 6. Influencia del contenido de fibra en la consistencia (índice de consistencia o viscosidad) a cada temperatura. $k = a_1 \exp(b_1 C)$	88
Tabla 7. Parámetros de la compensación cinética	91
Tabla 8. Parámetros de la ley de potencia para la correlación entre los módulos de almacenamiento y pérdida (G' y G''), en función de la frecuencia oscilatoria (f).....	97
Tabla 9. Valores de los parámetros reológicos del Modelo Figoni-Shoemaker en función del porcentaje de fibra y temperatura a una velocidad de cizalla de 100 s^{-1}	100
Tabla 10. Valores para los parámetros del modelo Herschel-Bulkley ($0.1 \text{ s}^{-1} < \dot{\gamma} < 300 \text{ s}^{-1}$, con promedio de tres replicas \pm desviación standard).	111
Tabla 11. Parámetros de la ecuación Arrhenius.....	113
Tabla 12. Influencia del contenido de fibra en la consistencia (índice de consistencia o viscosidad) a cada temperatura. $k = a_1 \exp(b_1 C)$	115
Tabla 13. Parámetros de la compensación cinética	117
Tabla 14. Parámetros de la ley de potencia para la correlación entre los módulos de almacenamiento y pérdida (G' y G''), en función de la frecuencia oscilatoria (ω) (1 pa, media de tres repeticiones \pm desviación estándar).....	123
Tabla 15. Valores de los parámetros reológicos del Modelo Figoni-Shoemaker en función del porcentaje de fibra y temperatura a una velocidad de cizalla de 100 s^{-1}	126
Tabla 16. Valores para los parámetros del modelo Herschel-Bulkley ($0,1 \text{ s}^{-1} < \dot{\gamma} < 300 \text{ s}^{-1}$, con promedio de tres replicas \pm desviación standard).	137
Tabla 17. Parámetros de la ecuación Arrhenius para el Zumo de Naranja.....	139
Tabla 18. Influencia del contenido de fibra en la consistencia (índice de consistencia o viscosidad) a cada temperatura. $k = a_1 \exp(b_1 C)$	140
Tabla 19. Parámetros de la compensación cinética	142
Tabla 20. Parámetros de la ley de potencia para la correlación entre el almacenamiento y los módulos de pérdida (G' y G''), en función de la frecuencia oscilatoria (ω) (1 pa, media de tres repeticiones \pm desviación estándar).	148
Tabla 21. Valores de los parámetros reológicos del Modelo Figoni-Shoemaker en función del porcentaje de fibra y temperatura a una velocidad de cizalla de 100 s^{-1}	150

Tabla 22. Valores para los parámetros del modelo Herschel-Bulkley ($0.1 \text{ s}^{-1} < \dot{\gamma} < 300 \text{ s}^{-1}$, con promedio de tres replicas \pm desviación standard).....	156
Tabla 23. Parámetros de la ecuación Arrhenius Zumo de Mandarina.....	159
Tabla 24. Influencia del contenido de fibra en la consistencia (índice de consistencia o viscosidad) a cada temperatura. $k = a_1 \exp(b_1 C)$	159
Tabla 25. Parámetros de la compensación cinética	161
Tabla 26. Parámetros de la ley de potencia para la correlación entre los módulos de almacenamiento y pérdida (G' y G''), en función de la frecuencia oscilatoria (ω) (1 pa, media de tres repeticiones \pm desviación estándar).	167

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Concepto básico de la fibra dietética

1.1.1 Definición

La fibra dietética es considerada un ingrediente importante desde el punto de vista nutricional debido a su función fisiológica y su capacidad de no absorción, ya que no participa directamente en procesos metabólicos básicos del organismo. A pesar de que hay un acuerdo en que la fibra dietética es importante en términos nutricionales, no ha habido un acuerdo para crear un concepto único, y por lo tanto existen diferentes conceptos, los cuales varían de país a país. Por ejemplo, la Asociación Americana de Química de Cereales (AACC) en Estados Unidos de América define la fibra de la siguiente manera: “La fibra dietética es la parte comestible de las plantas o carbohidratos análogos que son resistentes a la digestión y absorción en el intestino delgado humano con una fermentación completa o parcial en el intestino grueso. La fibra dietética incluye polisacáridos, oligosacáridos, lignina y sustancias vegetales asociadas. Las fibras dietéticas promueven efectos fisiológicos beneficiosos, como la laxación y/o la atenuación del colesterol en la sangre y/o la atenuación de la glucosa en la sangre” (American Association of Cereal Chemist, 2001). Por otro lado, el Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos del Reino Unido (IFST, 2007), conceptualiza la fibra dietética, como un material alimenticio, particularmente de origen vegetal que no es hidrolizado por las enzimas del tracto digestivo humano, pero, que puede ser digerido por la microflora intestinal. Los componentes vegetales que entran dentro de esta definición incluyen: polisacáridos no amiláceos tales como: celulosas, algunas hemicelulosas, gomas y pectina, así como los almidones resistentes (The Institute of Food Science and Technology, 2007).

En un estudio de revisión de conceptos del CODEX Alimentario, se clasifica la fibra dietética como un polímero de carbohidratos comestibles que se encuentra naturalmente en el alimento tal como se consume, así como polímeros de carbohidratos que se han

obtenido del alimento crudo por medios físicos, enzimáticos o químicos y que han demostrado tener un efecto fisiológico benéfico para la salud y como polímeros sintéticos que han demostrado tener un efecto fisiológico en beneficio de la salud (CODEX CX/NFSDU, 2007).

1.1.2 Composición de la fibra dietética

El término de fibra dietética incluye tanto la fibra insoluble en agua como fibra soluble en agua. La parte de fibra insoluble se compone principalmente de componentes de las paredes celulares, como celulosa, lignina y hemicelulosa, y su efecto es acortar el tiempo de tránsito intestinal, aumenta el volumen fecal y suaviza las heces. Por otro lado, la fibra soluble contiene polisacáridos celulósicos como pectinas, gomas y mucílagos que se encuentran en las frutas y otros granos y legumbres. La fibra soluble retrasa el vaciamiento gástrico, disminuye la absorción de glucosa, mejora la función inmunológica y reduce los niveles de colesterol en suero (Cummings, 2002).

La celulosa en particular está compuesta por residuos de β -glucopiranososa y es el componente principal de las paredes de las células vegetales, donde está asociada con hemicelulosa, pectina y lignina. Su estructura básica es una cadena de moléculas de D-glucosa unidas por enlaces glicosídicos β (1-4) (Figura 1). La resistencia mecánica de la celulosa, la resistencia a la degradación biológica, la baja solubilidad en agua y la resistencia a la hidrólisis ácida resultan de la unión de hidrógeno dentro de las microfibrillas. La celulosa no es digerida en ningún grado por las enzimas del sistema gastrointestinal humano (Dhingra *et al.*, 2012).

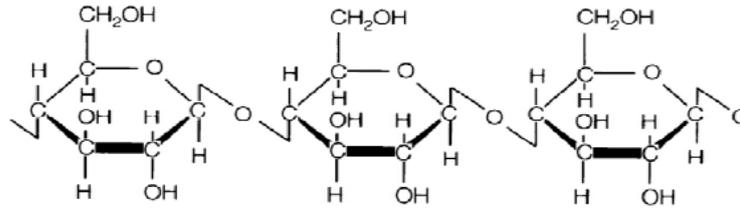


Figura 1. Unidad estructural básica de la celulosa (Aspinall, 1982).

La **hemicelulosa** (Figura 2), está constituida por pentosas y hexosas distribuidas de forma lineal y ramificada, formando polímeros de tipo polisacárido llamados no-celulosa. La hemicelulosa tiene un peso molecular más bajo que la celulosa y contiene como azúcares constitutivos la xilosa, arabinosa, galactosa, manosa, glucosa, ácido glucurónico y ácido galacturónico (Lineback, 1999). Estos son polisacáridos de la pared celular solubilizados por álcali acuoso después de la eliminación de polisacáridos pécticos y solubles en agua. La hemicelulosa contiene principalmente xilosa y algo de galactosa, manosa, arabinosa y otros azúcares (Anita y Abraham, 1997).

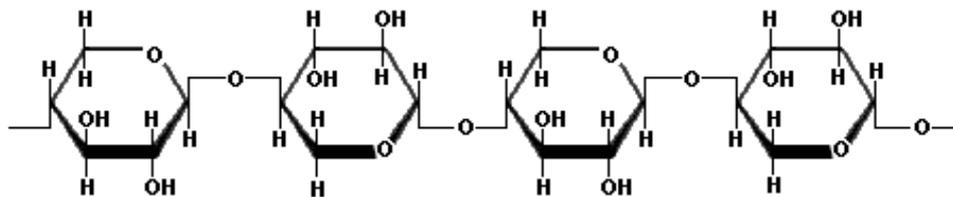


Figura 2. Estructura de la hemicelulosa (Kulkarni *et al.*, 2012).

La **lignina** es un complejo aleatorio de polímeros, los cuales varían en peso molecular y en contenido metoxilo. Debido a la fuerte unión intramolecular, que incluye enlaces carbono a carbono, la lignina es muy inerte. El tamaño de partícula puede influir en la capacidad de retención de agua de la fibra, esto sugiere que la estructura física de la fibra es el determinante más importante de la capacidad de hidratación (Kay, 1982). La

lignina demuestra mayor resistencia que cualquier otro polímero natural. Esta se asocia con células maduras de las plantas o bien concentrada en el tejido celular que tiene funciones especializadas en el apoyo a las plantas. Se compone de polímeros complejos que se bio-sintetizan a partir de varios alcoholes. Dentro de sus propiedades funcionales se pueden destacar sus propiedades antioxidantes en presencia de aceites vegetales (Catignani y Carter, 1982).

La **pectina** es un polisacárido que actúa como un material de cementación en las paredes celulares de todos los tejidos de las plantas (Chawla y Patil, 2010). Las sustancias pécticas son un grupo complejo de polisacáridos en los que el ácido D-galacturónico es un constituyente principal. Son componentes estructurales de las paredes celulares de las plantas y también actúan como sustancias cementantes intercelulares. La pectina es altamente soluble en agua y es casi completamente metabolizada por bacterias colónicas. Debido a su comportamiento gelificante, estos polisacáridos solubles pueden disminuir la tasa de vaciamiento gástrico e influir en el tiempo de tránsito del intestino delgado.

Las **gomas** y **mucilagos** son el tipo de fibra vegetal que no es componente de la pared celular y se forma en células secretoras especializadas (Van Denffer *et al.* 1976). Son un conjunto de polisacáridos de distinta naturaleza que disueltos o dispersos en agua producen un efecto espesante y/o gelificante. Son moléculas de alto peso molecular, constituidas por polímeros hidrofílicos de unidades de monosacáridos y derivados, unidos por enlaces glicosídicos formando largas cadenas, pudiendo estar constituidas por un solo tipo de monosacáridos o por monosacáridos distintos (Periago *et al.*, 1993).

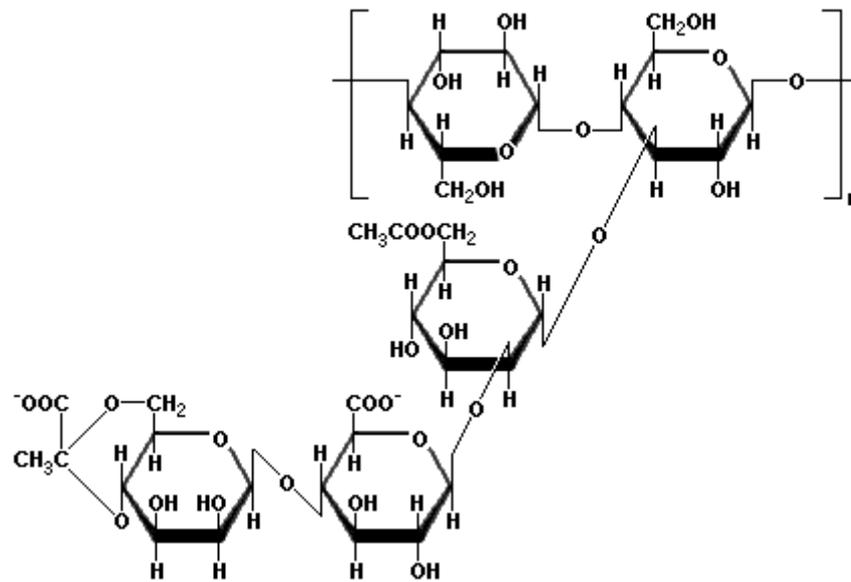


Figura 3. Estructura primaria de la goma xantana (Wang y Wang, 2013).

Las gomas son una exudación pegajosa que se forma en respuesta al trauma (goma arábica). Consisten principalmente en goma guar y goma arábica. Los efectos fisiológicos de esta fuente de fibra cumplen con lo que podría esperarse de una fibra soluble (Dhingra *et al.*, 2012).

Los mucilagos son polisacáridos, los cuales tienen una gran capacidad de retención de agua, y son sintetizados por células especiales que se forman en capas exteriores de las semillas. Están constituidos por cadenas de arabinosilanos muy ramificadas (Kay, 1982), y al igual que las gomas, estos compuestos también se utilizan como aditivos alimentarios.

1.1.3 Beneficios de la fibra dietética para la salud

La fibra dietética se encuentra presente de forma natural en los cereales, vegetales, frutas y nueces. La variación de su cantidad por alimento dependerá del mismo (Desmedt y Jacobs, 2001). Una dieta alta en fibra, en algunos casos contiene un porcentaje menor

de grasa, es también más grande en términos de volumen y en micronutrientes. Una dieta alta en fibra también, usualmente, requiere más tiempo para comer y esta puede crear la sensación de saciedad (Rolls *et al.*, 1999)

Está claro que las propiedades físicas de la fibra dietética ingerida también son determinantes importantes de los efectos fisiológicos. Hoy en día, más agencias gubernamentales se están interesando en los efectos de la fibra dietética en varias enfermedades. Los efectos fisiológicos de la fibra son determinados por sus componentes químicos y las características físicas de los mismos (Eastwood y Morris, 1992). Adicionalmente, se debe de tomar en cuenta que las propiedades de la fibra no solo dependen de la naturaleza de sus componentes y de la estructura del tejido del cual proceden, sino también de la forma en que el alimento haya sido procesado o consumido. La ingesta diaria de fibra recomendada para un adulto (20-35 g/día) generalmente excede la ingesta diaria de la población promedio. Por ejemplo, el adulto promedio en los Estados Unidos consume de 14 a 15 g de fibra dietética por día. Además, el consumo de fibra dietética en Asia y Europa también está por debajo de los niveles recomendados (Cho, 2001) Por lo tanto, es de gran interés para el sector alimentario abordar la inclusión de fibra en los alimentos.

El nivel de fibra dietética en las dietas que se componen de alimentos naturales, en contraste con las comidas semisintéticas formuladas, tiene un efecto profundo en la dieta en general. Los altos niveles de ingesta de fibra (30-40 g / día) solo se pueden lograr si la dieta contiene una alta proporción de alimentos vegetales y en particular de cereales (National Research Council (US) Committee on Diet and Health, 1989).

Varias organizaciones de alimentos y de salud han descrito muchos beneficios relacionados con los efectos en la salud de la ingesta de fibra dietética. Por ejemplo, sobre la salud gastrointestinal y la reducción del riesgo de enfermedades no transmisibles como

las enfermedades cardiovasculares, la diabetes tipo 2, el cáncer de colón rectal y el riesgo reducido de aumento de peso y regulación de la presión arterial (Chamorro y Mamani, 2010).

En la Tabla 1. se agrupan las propiedades fisicoquímicas de la fibra y su relación con los efectos fisiológicos y la aplicación terapéutica en la prevención y/o tratamiento de diversas enfermedades.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de la fibra y su relación con efectos fisiológicos (Grigeldo, 1997).

Propiedades	Efectos Fisiológicos	Aplicación Terapéutica
Susceptibilidad a la degradación bacteriana	Disminuye la síntesis del colesterol. Estabiliza el epitelio colónico. Regula el equilibrio bacteriano. Aumenta la adsorción de sodio y agua. Aumenta la flatulencia.	Hipercolesterolemia. Cáncer de colon-recto. Favorece la homeostasis.
Capacidad de retención de agua	Aumenta las señales de saciedad. Disminuye la adsorción de nutrientes y energía. Aumenta el peso de las heces. Disminuye el tiempo de tránsito intestinal.	Obesidad. Diverticulosis. Estreñimiento. Cáncer colon-recto.

		Aumenta la dilución de agentes carcinógenos.	
Capacidad de retención de compuestos orgánicos	de de	Aumenta la excreción de sales biliares y colesterol. Aumenta la excreción de hidratos de carbono. Aumenta la excreción de proteínas. Aumenta la excreción de vitaminas hidro y liposolubles- Aumenta la excreción de grasas.	Hipercolesterolemia. Diabetes/Obesidad. Trastornos cardiovasculares.
Capacidad de retención de cationes metálicos	de de	Disminuye la adsorción intestinal de minerales. Regula el pH del medio. Favorece la actuación bacteriana.	
Formación de soluciones viscosas	de	Disminuye la velocidad de adsorción de glucosa y otros nutrientes. Disminuye la velocidad de vaciado gástrico. Aumenta el tiempo de tránsito intestinal. Disminuye la interacción con enzimas.	Diabetes/Obesidad

En la actualidad no existe una única dosis exacta recomendada del consumo de fibra dietética en la dieta humana. Aunque, se sugiera que para los adultos el aporte sea

entre 20 – 35 g/día o bien aproximadamente 10-14 g de fibra dietética por cada 1.000 kilocalorías. Por otro lado, los infantes mayores de dos años y hasta la adolescencia, se recomienda un consumo de la cantidad que resulte de sumar 5 g/día a su edad. Los alimentos ricos en fibra insoluble son las harinas, los cereales, vegetales y frutas maduras y en fibra soluble la avena, cítricos y algunas legumbres. Adicionalmente, siempre se debe aconsejar que las fuentes de fibra sean variadas y que se realice una ingesta hídrica adecuada. En España, particularmente, se recomienda que la ingesta diaria de fibra dietética sea de aproximadamente 20 g/día. En términos prácticos, para el consumo de alimentos ricos en fibra se podría recomendar al día la ingesta el consumo de 3 raciones de verdura, 2 raciones de frutas, 6 raciones de cereales en distintas formas y 0,8 ración de legumbres (Álvarez, *et al.*, 2006). Por tanto, la mejor forma de lograr el cumplimiento de la ingesta recomendada se debe de aumentar el consumo de frutas, legumbres, verduras y cereales, lo cual implicaría cambios sustanciales en los regímenes alimentarios de muchas regiones. Sin embargo, el esfuerzo de los gobiernos por aumentar la ingesta de fibra dietética sin cambiar los regímenes alimentarios ha provocado que se incremente la producción y comercialización de productos elaborados con fibra añadida (Grigelmo, 1997). Es por eso por lo que, para satisfacer esa necesidad de estos productos, se ha desarrollado la fibra como subproducto con el fin de ser añadidos en los productos alimentarios como los zumos, cuya comercialización significaría una revaloración de los subproductos alimentarios y la apertura a nuevos mercados.

1.1.4 Fuentes de fibra dietética

La fibra dietética es obtenida principalmente de las paredes celulares de los vegetales. Otros componentes indigestibles como las gomas, mucilagos, pectina y otros

representan solo una pequeña proporción del total de la fibra de la dieta (García y Velasco, 2007).

La composición de la fibra que se ingiere en la dieta varía en función de la procedencia vegetal (Pak, 2018). Adicionalmente, la maduración de las plantas está asociada con el cambio de la composición de la fibra, aumentando las cantidades de celulosa y lignina a medida que avanza su estado de maduración. Por último, el contenido de la fibra de los alimentos también puede variar según su condición en el almacenamiento y vida de anaquel, así como también los procesos al cual es sometida antes del consumo (Anderson y Bridges, 1988)

1.1.5 Aplicaciones de fibra

La fibra dietética posee varias características las cuales permiten que sea considerada como un ingrediente alternativo en el desarrollo de nuevos productos. La adición de fibra dietética puede dar como resultado un cambio en la textura de consistencia, el comportamiento reológico y en las características sensoriales del producto final. Por lo tanto, una mayor comprensión del comportamiento de la fibra dietética durante su proceso dará lugar a una nueva oportunidad para que la industria alimentaria desarrolle nuevos productos funcionales (Guillón y Champ, 2000). Cada vez más, productos incluyen fibra dietética como ingrediente, los productos más conocidos y consumidos con fibra agregada son los cereales para el desayuno y los productos para hornear, como el pan integral y las galletas (Cho y Prosky, 1999). Las bebidas son otro sector de la industria alimentaria que se aventura en la adición de fibra dietética, a pesar de los desafíos en términos de cambios de viscosidad y estabilidad del producto. La fibra soluble es la más utilizada como ingrediente porque es más dispersable en agua (Dhingra *et al.*, 2012)

1.1.6 Extracción de fibra dietética

El objetivo de separar las fibras en sus constituyentes individuales es aislar y cuantificar fracciones de interés y eliminar compuestos no deseados. Se han investigado varios métodos de extracción de fibra y fraccionamiento de diversas fuentes de plantas. El método de extracción, los disolventes usados, el método del secado, la intensidad del tratamiento y la fuente de fibra afectan en gran medida las propiedades y la composición de las fibras resultantes. El método de extracción también afecta el comportamiento de las fibras en el cuerpo humano y en las aplicaciones alimentarias (Álvarez, 2006).

La elección del método de extracción utilizado para aislar las fibras depende en gran medida de la composición de la fibra particular, su complejidad, naturaleza química, grado de polimerización y la presencia de oligosacáridos (Chawla y Patil, 2010). La elección del método, el tiempo de contacto, la temperatura y la relación de disolvente a muestra son algunos parámetros que afectan mucho el rendimiento. También existen variaciones en las fibras de la misma fuente debido a variaciones en la agronomía, genética, madurez y condiciones climáticas. La base de todos los métodos de extracción de fibra es similar; sin embargo, el enfoque difiere según el producto final deseado, la aplicación prevista, la fuente de fibra y el equipo utilizado. Todos los métodos implican el fraccionamiento; esto permite la eliminación de constituyentes indeseados.

La fibra se puede extraer como un todo, denominada fibra total, o como fibra soluble o insoluble o como sus componentes individuales. Algunos métodos previamente investigados para extraer fibra de fuentes vegetales incluyen el procesamiento en seco, el procesamiento en húmedo, el químico, el gravimétrico, el enzimático, el microbiano o una combinación de estos métodos (Elleuch *et al.*, 2011).

Los métodos de procesamiento en seco se han aplicado con fines experimentales, así como en aplicaciones industriales. Estos métodos implican la desintegración de la

materia vegetal mediante molienda y clasificación por aire en fracciones de almidón y proteínas. La harina producida durante el proceso de molienda contiene dos poblaciones distintas de partículas, que difieren en tamaño y densidad. Para separar estas dos fases, se utiliza una corriente de aire; por lo tanto, el origen de la denominación "clasificación aérea (Grigelmo, 1997).

Para esta memoria se describe el proceso de obtención de la fibra dietética a partir de los subproductos generados en la elaboración de zumos de fruta, el cual comprende de la siguiente forma:

- *Obtención de la pulpa*

Una vez clasificada la fruta, se seleccionan las unidades que no cumplen con los requerimientos mínimos de calidad y son apartadas del proceso. Las frutas aptas para procesamiento se someten a diferentes operaciones dependiendo del tipo de frutas, para obtener por un lado zumo y por otro lado la parte sólida denominada comúnmente como pulpa o bagazo, el cual se destina para la obtención de la fibra.

- *Pretratamiento*

Una vez obtenida la pulpa, es sometida a dos trituraciones consecutivas con molino de tipo cónico hasta obtener la partícula deseada. Posteriormente, la pulpa refinada pasa a ser mezclada con agua y mediante una banda se envía a un rodillo secador.

- *Deshidratación*

El subproducto obtenido del proceso anterior se distribuye sobre un deshidratador para el secado por contacto el cual, a través de vapor, seca la pulpa en el tiempo necesario, obteniendo un producto entre 4 y 6% de humedad.

- *Molienda*

El producto resultante pasa por un molino del cual se obtiene un producto final en forma de polvo.

1.1.7 Alimentos con fibra añadida

La fibra dietética por su valor nutricional ha sido añadida a diferentes productos en el mercado a nivel mundial. Por otro lado, existe un interés en los gobiernos a nivel mundial para incrementar el nivel de consumo de la fibra dietética, provocando el desarrollo de nuevos productos con fibras añadidas. En la actualidad, los cereales y los lácteos son los productos que lideran el mercado de productos con fibra añadida. En el mercado internacional, Japón y Estados Unidos lideran el mercado de estos productos. En el continente europeo, los yogures, panadería, bebidas, confitería y productos cárnicos han sido los productos con fibra añadida.

Como se ha experimentado hasta ahora en el mercado global, la incorporación de fibra a los alimentos da valor agregado a los productos, los cuales aparte de contribuir a beneficiar la salud, atraen la atención del consumidor. Este interés, de parte de los consumidores y de los gobiernos, es un factor determinante para el impulso en la investigación y desarrollo de alimentos con fibra añadida. La fibra dietética actualmente se posiciona entre unos de los ingredientes más utilizado para el desarrollo de productos funcionales, por eso se prevé un crecimiento en el mercado agroalimentario.

1.1.8 Influencia de la adición de fibra en el comportamiento reológico

La fibra dietética pertenece a la categoría de carbohidratos, y normalmente se clasifican como insolubles o solubles. Los efectos fisiológicos de estos dos tipos de fibras varían, dependiendo de su estructura química. Estos efectos se pueden clasificar en capacidad de retención de agua, formación de gel y usabilidad microbiana. Un ejemplo de una fibra soluble utilizada en los alimentos son las gomas, y las pectinas, y dentro de las insolubles, la celulosa y la hemicelulosa. También, las fibras dietéticas pueden añadirse como una mezcla de fibra soluble e insoluble, siendo un ejemplo el salvado sin refinar. La capacidad de retención de agua y la solubilidad de la fibra dietética la convierte en un aditivo potencial para diferentes productos, ya sea para aumentar las propiedades nutricionales, funcionales, económicas o como un agente para dar volumen, estabilizar el producto o sustituir la grasa. La mayoría de las fibras solubles producen soluciones acuosas o forman geles en los que el líquido está inmovilizado (Endress y Fischer, 2008), mientras que las fibras insolubles normalmente tienen una alta capacidad de retención de agua y un efecto de volumen (Meyer y Tunland, 2001). Estas fibras dietéticas, se pueden diferenciar por sus características en el comportamiento reológico, este puede ser, un comportamiento viscoso, semi viscoso, formador de gel, o incremento en la retención de agua. Las fibras solubles como las gomas y pectinas producen soluciones acuosas o forman un gel en el que los fluidos presentan reducción en la movilidad, mientras que las fibras insolubles normalmente tienen una alta capacidad de retención de agua y un aumento en el volumen (Jonsson *et al.*, 2004).

Las fibras dietéticas se pueden usar en una variedad de aplicaciones en los productos lácteos, incluidos helados, yogures y quesos. El uso de fibras dietéticas en el helado ha tendido a centrarse en su aplicación para mantener la sensación de consistencia y reducir el contenido de grasa. Las gomas y otras fibras dietéticas se pueden usar para

reemplazar la grasa mientras se retiene la cremosidad y el cuerpo (Varnam y Sutherland, 1994). La estructura de gel que se forma mediante la adición de fibra permite estabilizar el producto probablemente como resultado de una mayor capacidad de retención de agua del helado durante esta fusión. En el caso de los yogures, la adición de fibra indica un aumento significativo en la viscosidad aparente y en la consistencia (Tudorica *et al.*, 2002). Esto puede estar relacionado con la capacidad de la fibra para unir el agua dentro de la estructura del yogurt y, por lo tanto, afectar las propiedades reológicas (Brennan *et al.*, 2003).

Algunas aplicaciones de las fibras dietéticas se han incorporado a la industria hortofrutícola. En un estudio por Grigelmo-Miguel y Martín-Belloso (1999), se estudió la adición de fibra como ingrediente en la elaboración de jaleas. En este estudio se concluyó que el reemplazo de la pectina con fibra dietética presentó un comportamiento pseudo-plástico, y que a medida que aumenta el contenido de fibra, aumenta la viscosidad de la jalea. En otro estudio por Augusto *et al.*, (2011), se evaluó la influencia de la adición de fibra en las propiedades reológicas del zumo de melocotón, concluyendo que la adición de fibra cambia el comportamiento reológico de un fluido newtoniano a un fluido pseudo-plástico.

La adición de fibra también ha sido incluida en otros productos, por ejemplo, en el sector cárnico, en donde se ha utilizado para mejorar la textura y la estabilidad de productos. La incorporación de fibra mejora la retención de agua, el espesamiento, la capacidad de emulsión y las propiedades gelificantes de los productos cárnicos, especialmente cuando la materia prima utilizada es de baja calidad funcional, pero puede causar una pérdida considerable de rigidez y elasticidad en los geles de proteínas musculares (Borderías *et al.*, 2005; Yoon y Lee, 1990).

La fibra soluble en agua es el componente que aumentaría la viscosidad de una solución (Abdul-Hamid y Luan, 2000; Olson *et al.*, 1987). Por otro lado, este aumento de la viscosidad incrementa a medida la temperatura disminuye en una solución con fibra dietética añadida.

1.2 Zumos de frutas

Las frutas son perecederas, lo que implica una vida útil de anaquel muy corta si esta es comercializada como fruta fresca. Es por eso por lo que es determinante la necesidad de la industrialización de las frutas para la elaboración de derivados con el fin de extender la vida de anaquel. La mayoría de los productos finales se comercializan como zumos, néctares, mermeladas, compotas, productos deshidratados, etc. Estos alimentos, se presentan en una gran variedad de formas: sólido, líquido y semi-sólido. La capacidad de crecimiento del mercado de los zumos presenta un aumento potencial muy grande, lo que crea un incentivo para crear y extender la variedad de productos que ofrezcan un mayor beneficio para los consumidores.

1.2.1 Concepto zumos de frutas

Recientemente, los consumidores han mostrado interés en la salud y el bienestar, por lo que son muy conscientes de lo que beben y lo que quieren beber. Es más probable que la población mundial elija productos de bebidas saludables y nutritivas que cumplan con la globalización al reducir el tiempo de preparación y la búsqueda de productos naturales en lugar de bebidas artificiales con sabor artificial. Los zumos de fruta, por lo tanto, son una opción popular de bebidas entre los consumidores, desempeñando un papel importante en la dieta humana (Rajauria y Tiwari, 2018)

Varios conceptos pueden describir el concepto de jugo de fruta y estos conceptos varían según las normas internacionales. De acuerdo con la Norma General del Codex para Zumos de Frutas y Néctares, los zumos de frutas se definen como el líquido no fermentado pero fermentable obtenido de la parte comestible de frutas sanas, maduras y frescas, o de frutas mantenidas en buenas condiciones por medios adecuados durante la postcosecha (CODEX STAN, 247-2005; AIJN, 2016).

El zumo de fruta concentrado es el producto que se obtiene a partir de zumos de frutas, por eliminación, mediante procedimientos físicos de una parte de su agua de constitución. Cuando el producto se destina al consumo directo, la concentración será al menos del 50 por 100.

1.2.2 Consumo de zumos

El consumo de zumos de fruta y néctares de la Unión Europea fue de 9.200 millones de litros en 2017. El consumo mundial de zumos de fruta y néctares equivalió a 36.200 millones de litros en 2017. En términos de consumo por región, Europa sigue siendo la región de mayor consumo, seguida de América del Norte y Asia. En términos de comportamiento del consumidor, los consumidores parecen estar cada vez más dispuestos a pagar precios más altos por los jugos premium que se perciben como más saludables y más naturales que la oferta ambiental. Los productores están respondiendo a la tendencia de la premiumización enfatizando la pureza, el patrimonio, la transparencia de la producción y los beneficios funcionales/saludables de sus jugos de frutas (AIJN, 2016).

El zumo de manzana es producido alrededor del mundo principalmente por los países productores de la fruta. A nivel mundial Estados Unidos, China y Polonia lideran la producción de estos zumos. Estados Unidos consume casi en su totalidad el zumo de manzana producido en el país (Rosa, 2000). Por otro lado, Polonia consume únicamente

un pequeño porcentaje de lo producido a nivel interno y exporta el 95% de la producción, principalmente en el mercado europeo, siendo Alemania el principal importador.

El concentrado de jugo de manzana es el producto de manzana procesado más activamente comercializado, y se comercializa como un producto en el mercado mundial. La mayoría de las exportaciones de jugo de manzana se comercializan en forma de concentrado no congelado. El zumo concentrado contribuye a que las regiones que no producen manzana puedan procesar los zumos y otros productos. En el hemisferio sur, Chile y Argentina son los mayores productores de zumo de manzana, y al igual que Polonia, exportan la mayoría del producto (Rowles, 2000). Argentina, es el mayor productor de zumo de manzana en el hemisferio sur, siendo Estados Unidos el mayor importador (Rosa, 1999). En el caso de China, este ha incrementado la producción rápidamente, y bajando sus precios para convertirse en uno de los mayores exportadores a nivel mundial y reduciendo sus importaciones en un 77% (Rowles, 2000).

En el caso del consumo de los cítricos, estos son cultivados en las regiones tropicales y subtropicales del mundo. Los productos cítricos procesados incluyen, zumos, pulpas, cáscaras de cítricos, aceites cítricos y esencias. En el mundo, los mayores productores de cítricos en orden de capacidad de producción son: China, Brasil y Estados Unidos. La producción de Brasil en su mayoría es destinada al procesamiento de jugo, el cual se exporta a Europa Occidental y Norte América. Estados Unidos, produce cítricos los cuales principalmente son procesados para la elaboración de zumos.

Para el zumo de naranja en particular, Brasil y Estados Unidos son los dos principales proveedores para el mercado mundial, aunque, en los últimos años, la participación de México en el suministro mundial ha crecido con la disminución en los EE. UU. Para el caso del zumo de limón, Argentina es el mayor productor, seguido de cerca por España. Sudáfrica también ha visto crecer su producción en los últimos años,

mientras que la producción en Turquía y Estados Unidos Estados (California y Arizona) se ha mantenido estable. Las mandarinas en su mayoría son utilizadas para el procesamiento de conservas y zumos. China y la Unión Europea dominan el mercado de estos productos procesados (Liu, 2003).

1.2.3 Clasificación de Zumos

Los zumos de fruta se pueden clasificar, según su sabor, apariencia, método de obtención, hasta su condición de almacenamiento. Si el producto es obtenido de un solo tipo de fruta, se le llama SOLO ZUMO. Si el producto es obtenido por la mezcla de 2 o más tipos de zumos se llama ZUMO MIXTO (CODEX STAN, 2005).

1.3 Propiedades reológicas de los alimentos

1.3.1 Principio básico

La ciencia de la reología tiene extensas aplicaciones en el campo de la industria de los alimentos (Barbosa-Cánovas *et al.*, 1996) y es definida como la ciencia que estudia la deformación de los materiales bajo la influencia de fuerzas mecánicas aplicadas. Se considera un material sólido como el material representado por la ley de Hooke y los líquidos son representados por la Ley de Newton; sin embargo, en la industria de los alimentos, existen una gran variedad de productos que cuando fluyen presentan diferentes comportamientos, y es precisamente por ese motivo que se debe de investigar y caracterizar reológicamente el alimento con el objetivo de optimizar su manipulación en la industria (Ibarz *et al.*, 1993).

Los alimentos se pueden clasificar de diferentes maneras, como sólidos, geles, líquidos homogéneos, suspensiones de sólidos en líquidos y emulsiones. Los alimentos fluidos son aquellos que no conservan su forma inicial, sino que toman la forma de su

envase. Estos fluidos contienen cantidades significativas de compuestos disueltos de alto peso molecular (polímeros) y/o sólidos suspendidos los cuales exhiben un comportamiento no newtoniano. Muchos de los fluidos no newtonianos exhiben propiedades tanto viscosas como elásticas, dichos fluidos se les conoce como fluidos viscoelásticos (Ahmed y Ramaswamy, 2006).

Los fluidos y semisólidos exhiben una amplia variedad de comportamientos reológicos que varían desde fluido newtoniano a dependiente del tiempo a viscoelástico. Los alimentos fluidos que contienen grandes cantidades de compuestos disueltos, como pulpa, azúcares añadidos y otros compuestos como la fibra exhiben en su mayoría comportamiento no newtoniano.

1.3.2 Aplicación de la reología a la industria alimentaria

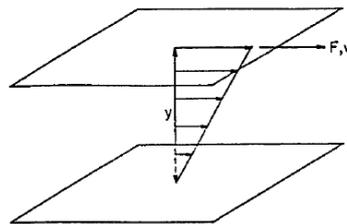
Identificar las propiedades de flujo y las propiedades de deformación de los alimentos es necesario para conseguir un diseño óptimo en las diferentes operaciones unitarias de transporte, concentración, evaporación, pasteurización, bombeo, diseño de tuberías, etc. (Anantheswaran y Rao 1985; Kokini, 1992). La viscosidad se utiliza en el cálculo de parámetros de fenómenos de transporte de cantidad de movimiento, materia y energía y su conocimiento evita posibles sobredimensionamientos en las operaciones unitarias involucradas (Ibarz *et al.*, 1992).

En términos de calidad, la viscosidad es utilizada en la industria como uno de los parámetros críticos en el control de calidad de alimentos (Osorio y Steffe, 1987). La caracterización de la reología a los productos permite el seguimiento de las características de consistencia y textura de las varias etapas del proceso productivo. También permite el control de los fenómenos indeseables, así como la calidad de las materias primas y de los productos finales.

La viscosidad permite determinar la estructura y composición de los alimentos, además, permite predecir los cambios estructurales durante los procesos de acondicionamiento y elaboración (Borwankar *et al.*, 1992) y es por esto por lo que es de suma importancia la caracterización reológica de las corrientes fluidas y la deducción de ecuaciones que permitan calcular las constantes reológicas en función del alimento considerado y de las variables de operación. La caracterización reológica de los fluidos busca obtener la relación entre la fuerza aplicada en el fluido, o sea el esfuerzo cortante y su respuesta a la deformación.

1.3.3 Viscosidad

La viscosidad es una medida de la capacidad de un fluido para resistir el movimiento cuando se aplica un esfuerzo de cizalla. Considerando una geometría simple, la placa superior es provocada a que se mueva con una velocidad (v) relativa a la placa inferior, como se muestra en la Fig. 4. Esta velocidad se debe a la aplicación de una fuerza de corte (F) por unidad de área. Las capas del fluido en contacto con las placas se mueven a las mismas velocidades en la superficie de contacto.



F = Fuerza

v = Velocidad

y = Distancia

Figura 4. Flujo viscoso (Barbosa-Cánovas *et al.*, 1993)

El fluido entonces se comporta como una serie de capas paralelas, o lámina, cuyas velocidades son proporcionales a su distancia del plato inferior. La diferenciación de velocidad respecto a la distancia (dv/dy) se define como gradiente de velocidad o velocidad de deformación:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \quad (1 - a)$$

Para el tipo de fluido conocido como fluido newtoniano, existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación (Ecuación 1-b). La viscosidad dinámica (o coeficiente de viscosidad) se define como la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, donde η se le llama viscosidad newtoniana, y $\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación por cizallamiento o velocidad de cizalla y σ es el esfuerzo cortante (Rao y Cooley, 1992).

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} \quad (1 - b)$$

La curva a en la Figura 5 ilustra la relación entre el esfuerzo cortante y velocidad de deformación de un fluido newtoniano. La pendiente de la línea, por definición es la viscosidad. Sin embargo, para la mayoría de alimentos, como por ejemplo los líquidos con sólidos suspendidos, presentan un comportamiento más complejo, por lo que no obedece a la ecuación 1-b. En su lugar, estos materiales exhiben un comportamiento pseudoplástico o dilatante. En estas situaciones la viscosidad ya no es constante, sino dependiente en la velocidad de deformación. La viscosidad dependiente de la velocidad de deformación se

llama viscosidad aparente (η_a). Las curvas b y c en la Figura. 5 muestran las relaciones entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación para los fluidos pseudoplásticos y dilatantes. Comparado con el comportamiento del fluido newtoniano (curva a), o bien exhiben una curvatura hacia arriba o hacia abajo. La ecuación típica caracteriza el engrosamiento de la cizalla y el fluido de dilución de la cizalla es la ley de potencia.

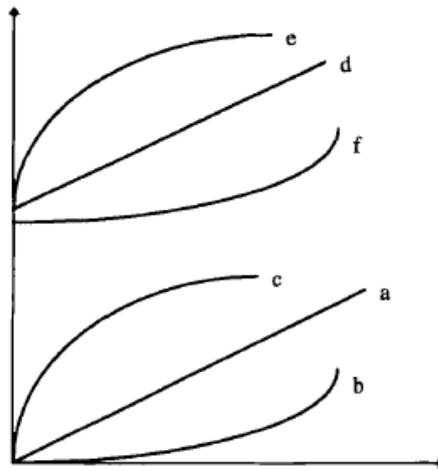


Figura 5. Reogramas para fluidos independientes del tiempo (Barbosa *et al.*, 1993).

Algunos otros fluidos o alimentos exhiben un límite elástico, el cual puede definirse como un esfuerzo cortante mínimo requerido para iniciar el flujo. El comportamiento de estos fluidos puede ser caracterizado con la ecuación de Herschel-Bulkley (Villarán *et al.*, 1997; Ibarz, *et al.*, 2009; Grigelmo-Miguel, 1999). Este modelo es capaz de describir las propiedades generales del flujo de los alimentos como la de los zumos de fruta dentro de un cierto intervalo de cizallamiento.

1.4 Caracterización reológica de los zumos de frutas con fibra añadida

Por definición, se puede definir la reología como el estudio de la deformación y el flujo de la materia (Rao, 2013). La elaboración de productos fluidos, como es el caso de los zumos de frutas, incluye distintos procesamientos de la materia hasta su producto final. Algunos de los procesos incluyen el transporte, pasteurización, filtración, evaporación, esterilización y otros procesos para conservar la vida de anaquel del producto. Adicionalmente, es necesario conocer la interacción de la viscosidad, la temperatura y la concentración de los sólidos solubles, ya que son de suma importancia en el cálculo de las operaciones involucradas en el procesamiento, especialmente los que incluyen transferencia de calor transporte de cantidad de movimiento y, de esta manera, predecir los parámetros requeridos para el procesamiento y para contribuir al diseño de equipo eficiente. Es importante tomar en cuenta, que el diseño apropiado de las operaciones unitarias es crucial para el procesamiento óptimo, para evitar la sobredimensión del equipo y de esta manera reducir los costos de producción (Falguera *et al.*, 2010).

La producción de zumos con fibra añadida ha incrementado en los últimos años, y conocer el comportamiento reológico de este producto, evitará el deterioro del producto durante su elaboración. Por ejemplo, durante la etapa de evaporación y enfriamiento, la viscosidad presenta cambios significativos, por lo que el diseño del proceso térmico requiere información precisa del comportamiento del flujo para optimizar las condiciones de proceso. También, estos cambios de viscosidad involucran distintos diseños eficientes en cuanto a la eficiencia de bombas de circulación durante el proceso.

Los alimentos se pueden clasificar de distintas formas, estos poder catalogarse como, alimentos sólidos, líquidos, geles, suspensiones, emulsiones, etc. Los alimentos fluidos, son aquellos alimentos que no conservan su forma, sino que adquieren la forma de su envase. Los alimentos fluidos contienen compuestos disueltos y/o sólidos

suspendidos, los cuales pueden comportarse como fluidos no newtonianos. Muchos de estos líquidos exhiben propiedades viscosas, elásticas o viscoelásticas (Augusto *et al.*, 2011).

Comprender el comportamiento reológico de los fluidos, está directamente relacionado con la estructura, componentes del producto, y con la temperatura. Para los zumos de frutas, los componentes solubles e insolubles, y las cantidades de sólidos en suspensión con la interacción con la temperatura determinarán el comportamiento reológico, por lo que se debe de tomar en cuenta para el diseño de las operaciones unitarias. La fibra como aditivo, está siendo utilizada en la industria alimentaria para conseguir mejores características del producto final, sin embargo, añadir fibra al zumo, significa cambios en viscosidad (Grigelmo-Miguel *et al.*, 1999). Estos cambios provocados por la adición de fibra presentan variaciones en la estabilidad del producto, ya que la adición de fibra se asocia con la sedimentación o flotación de las partículas.

1.4.1 Tixotropía del zumo con fibra añadida

En el comportamiento reológico, los fluidos pueden presentar una dependencia con el tiempo y la historia de flujo. En el dado caso que el fluido presente dependencia del tiempo, si la muestra de zumo al ser sometida a un gradiente de velocidad constante presenta una disminución de la viscosidad aparente η con el aumento del tiempo de flujo, el fluido presenta tixotropía. En el caso inverso, si la viscosidad aparente aumenta con el tiempo, el fluido presentará un comportamiento reopéctico.

Algunos autores coinciden en que los concentrados de frutas y algunos fluidos con características similares al puré, son tixotrópicos y que su comportamiento está estrechamente ligado con el porcentaje de pectinas y fibras totales en el producto (Crandall *et al.*, 1990; Lozano e Ibarz, 1994). La dependencia del tiempo está relacionada con el

cambio estructural debido al esfuerzo cortante. Si la cizalla se detiene, la viscosidad vuelve a su valor inicial debido a la recuperación estructural del material. Este proceso es reversible.

Los factores estructurales que contribuyen a la dependencia del tiempo con respecto al flujo de un material son similares a los que contribuyen a la característica pseudo-plástica (Rha, 1978). Por lo tanto, la tixotropía es el resultado de una reorganización estructural, con una disminución en la resistencia al flujo (Barbosa-Cánovas *et al.*, 1993). El método habitual para caracterizar la tixotropía es aplicar una velocidad de deformación constante y estudiar la variación del esfuerzo con el tiempo, y ajustar los datos experimentales a los modelos que describen esa variación (Tung *et al.*, 1970; Ibarz *et al.*, 1993). Los valores experimentales para el estudio tixotrópico se ajustaron al modelo Figoni y Shoemaker (1983).

1.4.2 Efecto del tiempo en la viscosidad

Las propiedades reológicas que dependen del factor tiempo reflejan la naturaleza de un sistema estructural y puede deberse a su viscoelasticidad, a los cambios estructurales o en su defecto a ambas (Harris, 1972). La ruptura de la estructura puede provocar una disminución de la viscosidad de un fluido. Es por eso la importancia de considerar el tiempo como factor en la caracterización de las propiedades de flujo, ya que estas son importantes para el diseño de procesos, y para establecer las relaciones entre la estructura y el flujo.

1.4.3 Efecto de la temperatura en la viscosidad

La temperatura, ya sea baja o alta, es incluida en muchos de los procesos alimentarios y de almacenamiento. Es por eso por lo que investigar su efecto sobre los

alimentos, es de mucha importancia. El efecto de la temperatura sobre la viscosidad a una velocidad de deformación específica o el índice de consistencia k , del modelo de la ley de la potencia, puede describirse mediante una ecuación tipo Arrhenius (Rao *et al.*, 1982), dicha relación es explicada en el Capítulo 4.

1.4.4 Viscoelasticidad

Algunos materiales alimenticios pueden presentar comportamientos viscoelásticos, es decir, que presentan propiedades viscosas y elásticas al mismo tiempo. Estos alimentos, tienen una configuración única, la cual le permite regresar a una estructura cercana a su estructura original después de liberar las tensiones deformantes. La viscoelasticidad lineal es el comportamiento viscoelástico más simple en el que la relación de estrés a tensión es una función solo del tiempo y no de la tensión o la magnitud de la tensión. Bajo una pequeña tensión, la estructura molecular no se verá prácticamente afectada y se observará un comportamiento viscoelástico lineal.

1.4.5 Compensación cinética y termodinámica

Constable (1925) fue el primer autor en observar la compensación cinética, en este caso en reacciones catalíticas. Después, Leffler (1955) encontró que la constante cinética o constante de equilibrio para algunas reacciones químicas no pueden depender de una variable ambiental (por ejemplo, pH, disolvente, presión, actividad del agua, etc.) a una temperatura específica, la llamada temperatura isocinética. Esta temperatura isocinética es una consecuencia de la relación lineal entre la entalpía de activación y entropía de activación o entre los parámetros de la ecuación de Arrhenius.

Desde entonces, este concepto se ha aplicado a muchas otras reacciones químicas y cambios físicos como adsorción y secado, e incluso propiedades físicas como la

viscosidad. El estudio de la existencia de compensación puede ser muy importante porque cuando cualquier tipo de compensación tiene lugar, se puede concluir que la reacción mecanismo no cambia tanto para los rangos de temperatura y la variable de ambiente utilizada. La aplicación de este concepto aplicado a las reacciones alimentarias inició en los años ochenta. Cuando se estudian las constantes cinéticas, el proceso suele ser llamada compensación cinética, mientras que cuando las constantes de equilibrio son estudiadas, el proceso generalmente se llama termodinámico o entalpía-entropía compensación.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

2.1 Objetivos y Plan de Trabajo

2.1.1 Justificación e interés de la tesis doctoral

En los últimos años, los nuevos hábitos alimentarios han provocado cambios significativos en características físicas y sensoriales de los productos que hoy en día se consumen. En la actualidad, los productos que la industria ofrece son cada vez más procesados con el fin de ofrecer más conveniencia y extender la vida de anaquel. Productos como los zumos, concentrados de frutas, jaleas, purés, etc., son un ejemplo claro de esta evolución en los productos alimentarios. Europa es el continente con mayor incremento en cuanto a producción de productos procesados derivados de frutas, lo que permite que haya un aprovechamiento del nicho de mercado y se desarrollen y mejoren los productos procesados y que, al mismo tiempo, permita comercializar los excedentes productivos de las frutas.

Así como los nuevos hábitos alimentarios han provocado un cambio en el tipo de producto, así también, ha habido un impacto en los cambios en cuanto a su valor nutricional y sensorial de los productos. Y es por esto, que hay interés de parte de la industria en conocer el comportamiento del producto tanto durante su producción como su vida útil, y de esta manera ofrecer productos que satisfagan la demanda de los consumidores. La adición de fibra en los alimentos se ha convertido en una tendencia en distintos sectores del procesamiento alimentaria, principalmente por sus propiedades nutricionales. Las recomendaciones constantes de aumentar el consumo diario de fibra dietética han llevado a la industria a crear alimentos que contribuyan a aumentar la ingesta diaria recomendada de fibra y es por esto por lo que entender los cambios de las propiedades físicas y sensoriales es crucial para el diseño y desarrollo de estos productos.

Anteriormente, el comportamiento reológico de estos zumos ha sido estudiado extensivamente, utilizando varios modelos reológicos; sin embargo, pocos estudios han

abordado el comportamiento reológico evaluando temperatura y la adición de fibra en estos zumos. En cuanto a la caracterización reológica de los alimentos, ésta es necesaria para el proceso de diseño de operaciones unitarias, como el bombeo, mezcla y transmisión de calor. El propósito de este trabajo es estudiar el efecto de la adición de fibra en el comportamiento reológico de zumos de manzana, limón, naranja y mandarina.

2.2. Objetivos

2.2.1 Objetivo principal

Evaluar la influencia de la temperatura y adición de fibra dietética de manzana, limón, naranja y mandarina en las propiedades reológicas de los zumos de manzana, limón, naranja y mandarina, respectivamente.

Para llevar a cabo este objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

2.2.2 Objetivo específicos

- Modelar los cambios de comportamiento durante el proceso de adición de fibra de los zumos de manzana, limón, naranja y mandarina.

- Caracterización tixotrópica de los zumos de manzana, limón, naranja y mandarina, con la adición de fibra de manzana, limón, naranja y mandarina, respectivamente.

- Caracterización de la curva de flujo de los zumos de manzana, limón, naranja y mandarina, con la adición de fibra de manzana, limón, naranja y mandarina, respectivamente.

- Caracterización viscoelástica de los zumos de manzana, limón, naranja y mandarina, con la adición de fibra de manzana, limón, naranja y mandarina, respectivamente.

- Estudiar el efecto de la temperatura sobre la adición de fibra dietética de los zumos de los zumos de manzana, limón, naranja y mandarina, respectivamente.

- Estudiar el efecto de la concentración sobre la adición de fibra dietética de los zumos de los zumos de manzana, limón, naranja y mandarina, respectivamente.

- Ajustar los modelos matemáticos que explique los comportamientos al flujo de la disolución de los concentrados de fibra dietética.

- Estudiar el efecto de la temperatura y la adición de fibra dietética para determinar la existencia de compensación cinética de los zumos de los zumos de manzana, limón, naranja y mandarina, respectivamente.

2.3 Plan de Trabajo

Para poder llegar a cumplir los objetivos marcados en esta tesis, se siguió el siguiente plan de trabajo:

- ❖ Revisión bibliográfica para encontrar los antecedentes sobre el efecto de la temperatura y la adición de fibra en zumos de frutas y productos similares como ser pulpas y purés y de esta forma poder fijar el plan de trabajo a seguir.

- ❖ Aprendizaje, conocimiento y pruebas piloto para operar el reómetro y el programa Rheowin Job y Rheowin Manager.
- ❖ Determinación de los parámetros de medición para las distintas pruebas reológicas.
- ❖ Realización de las pruebas de tixotropía y curva de flujo del zumo de manzana con fibra añadida (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, y 16 %) a 5, 15, 30, 45 y 60 °C.
- ❖ Análisis de resultados de curva de flujo para la determinación de experimentos de viscoelasticidad.
- ❖ Realización de pruebas para la determinación del perfil viscoelástico del zumo de manzana con 12, 14, 16 y 18% de fibra a 5, 15, 30, 45 y 60 °C.
- ❖ Realización de las pruebas de tixotropía y curva de flujo del zumo de limón con fibra añadida (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 18, 20, 22%) a 5, 15, 30, 45 y 60 °C.
- ❖ Análisis de resultados de curva de flujo para la determinación de experimentos de viscoelasticidad.
- ❖ Realización de pruebas para la determinación del perfil viscoelástico del zumo de limón con 18, 20 y 22 % de fibra a 5, 15, 30, 45 y 60 °C.
- ❖ Realización de las pruebas de tixotropía y curva de flujo del zumo de naranja con fibra añadida (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, y 18 %) a 5, 15, 30, 45 y 60 °C.

- ❖ Análisis de resultados de curva de flujo para la determinación de experimentos de viscoelasticidad.

- ❖ Realización de pruebas para la determinación del perfil viscoelástico del zumo de naranja con 16 y 18 % de fibra a 5, 15, 30, 45 y 60 °C.

- ❖ Realización de las pruebas de tixotropía y curva de flujo del zumo de mandarina con fibra añadida (0, 2, 4, 6, 8, 10, %) a 5, 15, 30, 45 y 60 °C.

- ❖ Análisis de resultados de curva de flujo para la determinación de experimentos de viscoelasticidad.

- ❖ Realización de pruebas para la determinación del perfil viscoelástico del zumo de mandarina con 8 y 10 % de fibra a 5, 15, 30, 45 y 60 °C.

- ❖ Análisis estadístico de los datos.

- ❖ Continuación de la revisión bibliográfica referente a los resultados encontrados en el análisis estadístico.

- ❖ Discusión de los resultados, elaboración de conclusiones y comunicación de resultados.

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales y Métodos

Los experimentos desarrollados para esta tesis fueron llevados a cabo en el departamento de Tecnología de Alimentos de la Universidad de Lleida (Lleida, Cataluña, España).

3.1.1 Materias Primas

Los zumos de frutas fueron obtenidos en presentación de concentrado por Nufri S.A.T. (Lleida, España). Para la preparación de la muestra, el zumo concentrado fue diluido con agua destilada hasta alcanzar 12,5 Brix para la producción de un zumo listo para consumo. Los sólidos totales fueron determinados utilizando un refractómetro ATAGO RX-100 a una temperatura de 20°C.

Se utilizaron cuatro fibras diferentes de manzana, limón, naranja y mandarina, obtenidas de una empresa distribuidora española (Indulleida, S.A., Alguaire, España). que suministra este tipo de ingredientes a la industria alimentaria y que se describen a continuación de acuerdo a la ficha técnica aportada por cada una de ellas.

3.1.2 Fibra de Manzana

La fibra de manzana fue provista por la empresa Indulleida, S.A. de la región de Lleida (España). La fibra de manzana es obtenida como subproducto del procesamiento del zumo de manzana a partir de manzanas mediterráneas durante el despulpado en donde algunos subproductos de la fruta son troceados, y molidos hasta obtener un polvo debidamente secado con una humedad de un 5-10%, con un sabor típico a manzana y con un color café claro. Se compone de fibra soluble (8%) y fibra insoluble (35%), con humedad menos al 10%, 3% de grasa, un contenido proteico de 4% y 3% ceniza.

3.1.3 Fibra de Limón

La fibra de limón obtenida fue provista por la empresa Indulleida, S.A. (Lleida, España). La fibra de limón es obtenida como subproducto del procesamiento del zumo de limones mediterráneos durante el despulpado en donde algunos subproductos de la fruta son troceados, y molidos hasta obtener un polvo debidamente secado con una humedad de <15% y de color café oscuro. Presenta una total de fibra dietética de >30%, de los cuales >10% es soluble y >20% insoluble. Contiene un porcentaje de grasa de 2%, 7% de proteínas y 5% de cenizas.

3.1.4 Fibra de Naranja

La fibra de naranja obtenida de naranjas mediterráneas fue provista por la empresa Indulleida, S.A. (Lleida, España). La fibra de naranja es obtenida como subproducto del procesamiento del zumo de naranja durante el despulpado en donde algunos subproductos de la fruta son troceados, y molidos hasta obtener un polvo debidamente secado con una humedad de un menor al 15 %, con un sabor típico a naranja y con un color café oscuro. Presenta una total de fibra dietética de >30%, de los cuales >10% es soluble y >20% insoluble. Contiene un porcentaje de grasa de 2%, 7% de proteínas y 4% de cenizas.

3.1.5 Fibra de Mandarina

La fibra de mandarina obtenida fue provista por la empresa Indulleida, S.A. (Lleida, España). La fibra de mandarina es obtenida como subproducto del procesamiento del zumo de mandarina durante el despulpado en donde algunos subproductos de la fruta son troceados, y molidos hasta obtener un polvo debidamente secado con una humedad de <10% y de color amarillo. Presenta una total de fibra dietética de >30%, de los cuales >10% es soluble y >20% insoluble.

Para la preparación de cada una de las muestras, la fibra fue mezclada para producir un zumo listo para consumo utilizando un homogeneizador (Ultra-Turrax IKA) por 3 minutos a 15,000 rpm, para obtener los zumos con las concentraciones deseadas ($C_f = 0,0 - 22 \%$, w/w).

Las mediciones reológicas se llevaron a cabo en un reómetro (Haake RS 600, Haake, Alemania), utilizando una geometría Couette (Cilindro concéntrico; Haake Z40-DIN) con relación radio de taza y rotor de 1,0847 (radio rotor = $20 \pm 0,004$ mm). Las mediciones reológicas que presentaron una mayor consistencia viscosa fueron analizadas con la geometría plato-plato (60 mm de diámetro, Haake PP 60 Ti).

La temperatura se mantuvo constante mediante un baño de agua (Phoenix ThermoHaake C25P) con una desviación inferior a $\pm 0,8$ °C. La evaluación reológica se llevó a cabo con nuevas muestras sin historia mecánica. Se colocaron las muestras en el reómetro y se dejaron reposar por 10 minutos antes de iniciar los respectivos experimentos.

3.2 Caracterización tixotrópica

La caracterización tixotrópica ha sido realizada para los zumos de manzana con fibra a concentraciones de 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, y 16%, limón con la adición de fibra a concentraciones de 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 22%, naranja con la adición de fibra a concentraciones de 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14,16, 18% y de 0, 2, 4, 6, 8, 10% para el zumo de mandarina. Se utilizó el reómetro con la geometría Couette (Cilindro concéntrico; Haake Z40-DIN) para los zumos de manzana, limón, mandarina y naranja para las

concentraciones de 0 a 12% y para los porcentajes de 14 y 16% en manzana, 20 y 22% en limón, 16 y 18% en naranja y 6, 8 y 10% se utilizó la geometría plato-plato (60 mm de diámetro, Haake PP 60 Ti).

Para cuantificar la presencia de tixotropía se trabajó con temperaturas de 5, 15, 30, 45 y 60 °C. Las evaluaciones de tixotropía de las muestras se sometieron a un gradiente de velocidad constante de 100 s^{-1} durante 300 segundos y se registraron los valores del esfuerzo cortante en función del tiempo a las diferentes temperaturas. Se coloca la cantidad de muestra en el reómetro, esta cantidad varía de acuerdo con el sensor utilizado y se retira el exceso de la muestra con una jeringa o una pipeta, con el fin evitar posibles errores en las medidas. Las muestras se dejan en reposo por 20 minutos para permitir su relajación y el equilibrio de la temperatura. En cada experimento se trabaja con una muestra nueva. Para cuantificar este comportamiento tixotrópico se aplicó el modelo de Figoni - Shoemaker (1983).

Mediante un programa informático, la variación del esfuerzo cortante, σ , con el tiempo a una velocidad de deformación constante $\dot{\gamma}$ ha sido controlada automáticamente, y estos datos del esfuerzo cortante son recolectados cada 2 segundos. Los valores recolectados del estudio tixotrópico de los zumos de fruta han sido ajustados a ecuaciones y modelos específicos, y los cuales han sido analizados a través de regresiones realizadas con el paquete estadístico STATGRAPICS Centurión XVI.I.

3.3 Caracterización del comportamiento reológico al flujo

Las medidas reológicas de comportamiento al flujo fueron determinadas según los parámetros observados en otros estudios y en los resultados obtenidos de los estudios de

tixotropía. La Tabla 2. describe las mediciones y las geometrías utilizadas para los experimentos.

Tabla 2. Geometría utilizada para los estudios

Muestra	Geometría	Concentración de fibra %	Temperatura
Zumode Manzana	Cilindro concéntrico; Haake Z40-DIN	0-12 (Intervalo de 2)	5, 15, 30, 45, 60 °C
	Plato-plato (60 mm de diámetro, Haake PP 60 Ti).	14-16	
Zumode Limón	Cilindro concéntrico; Haake Z40-DIN	0-16 (Intervalo de 2)	5, 15, 30, 45, 60 °C
	Plato-plato (60 mm de diámetro, Haake PP 60 Ti).	18-22 (Intervalo de 2)	
Zumode Naranja	Cilindro concéntrico; Haake Z40-DIN	0-12 (Intervalo de 2)	5, 15, 30, 45, 60 °C
	Plato-plato (60 mm de diámetro, Haake PP 60 Ti).	14-18 (Intervalo de 2)	
Zumode Mandarina	Cilindro concéntrico; Haake Z40-DIN	0-4 (Intervalo de 2)	5, 15, 30, 45, 60 °C
	Plato-plato (60 mm de diámetro, Haake PP 60 Ti).	6-10 (Intervalo de 2)	

Los experimentos de cizalla en estado estacionario se llevaron a cabo a una velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$) entre 0,01 - 300 s⁻¹, con excepción de las muestras de los zumos puros (0% fibra) y zumos al 2% de fibra, donde las velocidades de cizallamiento fueron de máximo 80 s⁻¹, y 150 s⁻¹ respectivamente, debido a la formación de vórtices de Taylor en altos valores (es decir, flujos turbulentos secundarios, que no pueden ser utilizados en el análisis reológico (Steffe, 1996)). Las muestras fueron sometidos a ciclos de cizallamiento en rampas de tres-flujo (arriba, abajo y hasta los ciclos); los datos de la tercera rampa se utilizaron para el análisis (Sato y Cunha, 2007).

Los experimentos se llevaron a cabo en tres repeticiones. Los datos experimentales en el estudio del comportamiento al flujo han sido obtenidos automáticamente a través del programa informático RheoWin Job Manager. Para la obtención de estos datos, el equipo de medición ha sido calibrado previamente. Este programa proporciona directamente los valores del esfuerzo cortante para la velocidad de deformación aplicada. El comportamiento al flujo del zumo fue modelado utilizando el Modelo de Herschel-Bulkley para estudiar el comportamiento de flujo de los productos.

3.4 Caracterización viscoelástica

La caracterización viscoelástica fue realizada para todas las muestras que presentaron tixotropía y un comportamiento pseudoplástico en las observaciones previas. Para el caso de zumo de manzana se examinaron las concentraciones de 12, 14, 16 y 18% de fibra, para el caso del zumo de limón se examinaron las concentraciones de 18 20 y 22% de fibra, para el zumo de naranja se examinaron de 18 y 20% y para el zumo de mandarina de 8 a 10% de fibra.

Las medidas viscoelásticas se han sido realizadas con un reómetro Haake RS 600 (Haake, Karlsruhe, Germany). La geometría utilizada fue de cilindros concéntricos; Haake

Z40-DIN para las muestras de zumo de manzana con fibra, zumo de limón con fibra y zumo de naranja con fibra y la geometría Plato-plato (60 mm de diámetro, Haake PP 60 Ti) para el zumo de mandarina con fibra. Todas las muestras se quedaron en reposo durante 10 minutos para permitir la relajación de las mismas.

Cada una de las evaluaciones fue llevada a cabo con muestras nuevas para evitar historia mecánica. Se fijó una frecuencia y se obtuvieron los valores de G' y G'' en función del esfuerzo (Stress Sweep), permitiendo obtener el intervalo lineal de los parámetros. Una vez seleccionado el valor del esfuerzo dentro de la región lineal, se seleccionó el barrido de frecuencia (*frequency sweep*) entre 0,1 a 10 Hz para la ejecución de los trabajos experimentales. La temperatura de las muestras fue mantenida a través de un sistema de atemperación, el cual consiste en un circuito de agua que permite mantener las temperaturas deseadas. La entrada de la deformación y la salida de los datos de esfuerzo cortante fue automáticamente controlada con el programa informático RheoWin Job Manager. Las medidas fueron realizadas en tres repeticiones.

CAPÍTULO 4

MODELOS MATEMÁTICOS

4.1 Modelos matemáticos

Para cuantificar y predecir los cambios de los zumos de manzana, limón, naranja y mandarina con fibra añadida a diferentes temperaturas se requiere un modelado concreto para cada uno de los casos. Se considera que un modelo de flujo es una ecuación matemática que puede describir datos reológicos, como, por ejemplo, la velocidad de deformación frente al esfuerzo cortante, en un diagrama básico, y que proporciona una concisa forma de describir la información. En alguno de los casos, es necesaria más de una ecuación para describir los datos reológicos. Adicionalmente, aparte de la conveniencia matemática, es importante cuantificar cómo los parámetros del modelo se ven afectadas por las variables, como la temperatura y la adición de fibra en los zumos de frutas (Rao, 2013).

4.1.1 Comportamiento tixotrópico

La tixotropía se identifica por una reducción continua de la viscosidad aparente con el tiempo de cizalla y una recuperación de la viscosidad una vez que la velocidad de deformación se ha detenido (Lozano e Ibarz, 1994). La respuesta tixotrópica de un fluido puede determinarse midiendo el esfuerzo cortante en función del tiempo a una velocidad de deformación determinada que permanece constante durante la prueba instrumental. El modelo para cuantificar este comportamiento es este estudio es el Figoni-Shoemaker (1981).

$$\sigma = \sigma_e + (\sigma_i - \sigma_e) \exp(-kt) \quad (2)$$

Donde σ es el esfuerzo cortante en Pa, σ_e es el esfuerzo cortante del equilibrio en Pa, σ_i es el esfuerzo cortante correspondiente al tiempo inicial en Pa y k la constante cinética de degradación de la estructura (s^{-1}) y t es el tiempo (s).

4.1.2 Comportamiento al flujo

Existen diferentes modelos reológicos que describen el comportamiento del flujo (Rha, 1978; Rao *et al.*, 1984; Kokini *et al.*, 1992; Canet *et al.*, 2005), pero los más habituales para fluidos alimentarios son los siguientes:

$$\text{Ley de newton} \quad \sigma = \eta \dot{\gamma} \quad (3)$$

$$\text{Ley de la potencia} \quad \sigma = k \dot{\gamma}^n \quad (4)$$

$$\text{Ecuación Bingham} \quad \sigma = \sigma_o + \eta' \dot{\gamma} \quad (5)$$

$$\text{Ecuación Herschel – Bulkley} \quad \sigma = \sigma_o + k \dot{\gamma}^n \quad (6)$$

El comportamiento al flujo de un fluido newtoniano se modela con la Ecuación 3. Correspondiente al modelo de Newton en el cual, η se le llama viscosidad newtoniana, y en donde $\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación en s^{-1} , y σ es el esfuerzo cortante en Pa. Otros fluidos alimentarios más complejos, es decir, que presentan un comportamiento diferente al newtoniano no obedecen a esta ecuación 3. En su lugar presentan un comportamiento pseudo-plástico. En estas situaciones, la viscosidad ya no es constante, sino dependiente en la velocidad de deformación. La viscosidad dependiente de la velocidad de deformación se llama viscosidad aparente (η_{app}). La ecuación típica para caracterizar el espesamiento de cizallamiento y el fluido de cizallamiento es la ley de potencia (Ecuación 4), y la ecuación de Bingham, donde k es el índice de consistencia ($Pa \cdot s^n$), n es el índice de comportamiento de flujo y η_{ap} la viscosidad aparente ($Pa \cdot s$) y η' la viscosidad plástica.

El comportamiento al flujo de las disoluciones de los concentrados de fibra dietética se intentó explicar según el modelo Herschel-Bulkley. Donde σ es el esfuerzo

cortante en Pa, $\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación (s^{-1}), k es el índice de consistencia (Pa.s), n es el índice de comportamiento de flujo (adimensional = Si $n > 1$: dilatante. Si $n < 1$: pseudoplástico) y σ_0 es el esfuerzo cortante umbral (Pa) que representa el esfuerzo cortante inicial para que el fluido comience a fluir. El modelo Herschel-Bulkley es elegido para ajustar datos experimentales en pulpas de frutas debido a su característica de ser un modelo completo que puede describir todos los parámetros reológicos (Esfuerzo cortante inicial, índice de consistencia e índice de comportamiento al flujo).

Los valores de índice de consistencia (k) e índice de comportamiento de flujo (n) se determinaron utilizando una modificación en forma linealizada de la ecuación 6, (ecuación 7):

$$\log (\sigma - \sigma_0) = \log k + n \log \dot{\gamma} \quad (7)$$

4.1.3 Influencia de la temperatura sobre la viscosidad

En general, el efecto de la temperatura sobre la viscosidad o índice de consistencia se puede expresar según a ecuación tipo Arrhenius (Vitali y Rao, 1982; Aguado e Ibarz, 1988, Alonso y Zapico *et al.*, 1996).

$$\text{Ecuación de Arrhenius: } k = k_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

Donde k es la consistencia, ya sea la viscosidad (Pa.s) o el índice de consistencia ($Pa \cdot s^n$), k_0 es el parámetro predicho k a temperaturas extremadamente altas, E_a es la energía de activación al flujo ($J \cdot mol^{-1}$), R es la constante de gas ideal ($8,314 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$) y T es la temperatura absoluta (K).

4.1.4 Efecto de la concentración en la viscosidad

Se ha encontrado que la dependencia de los parámetros de flujo en cualquier tipo de concentración se ajusta a las siguientes expresiones matemáticas de uso más frecuente (Vitali y Rao, 1982; Rao *et al.*, 1984; Ibarz *et al.*, 1992, 1996, Grigelmo *et al.*, 1997; Giner *et al.*, 1996):

$$\text{Función Exponencial} \quad k = a_1 \exp(b_1 c) \quad (9)$$

$$\text{Función potencial:} \quad k = a_2 c^{b_2} \quad (10)$$

$$\text{Función exponencial - polinomial:} \quad k = a_3 \exp(b_3 c + d_3 c^2) \quad (11)$$

Don

de k es la viscosidad o el índice de consistencia, c es la concentración y a_1 , b_1 , a_2 , b_2 , a_3 , b_3 y d_3 son constantes.

4.1.5 Efecto de la temperatura y porcentaje de fibra sobre la viscoelasticidad

Los módulos de almacenamiento (G') y pérdida (G'') se modelaron como una función de potencia de frecuencia oscilatoria (ω) (ecuaciones 12 y 13, donde n' y n'' son el índice de comportamiento y k' y k'' son el índice de magnitud del módulo en el modelo de ley de potencia de las propiedades viscoelásticas), como se usa comúnmente para describir el comportamiento viscoelástico de los alimentos y las dispersiones (Rao, 1982).

$$G' = k' \cdot \omega^{n'} \quad (12)$$

$$G'' = k'' \cdot \omega^{n''} \quad (13)$$

4.1.6 Compensación cinética

El concepto llamado compensación cinética para las reacciones químicas se produce cuando el logaritmo del factor de frecuencia ($\ln k_0$) depende linealmente de la energía de activación (E_a) para los diferentes valores de la variable ambiental en la que la ecuación de Arrhenius (ecuación 8) fue previamente ajustada (Garvín *et al.*, 2017).

En este caso, el parámetro estudiado puede ser la viscosidad para modelos newtonianos o el índice de consistencia para modelos no newtonianos. La ecuación en línea recta que causa la compensación de consistencia es la siguiente (Ozilgen y Bayindirli, 1992; Garvín *et al.*, 2017):

$$\ln k_0 = a - bE_a \quad (14)$$

en el que a es el valor del logaritmo de la viscosidad o del índice de consistencia a la temperatura de isoconsistencia, que se puede obtener de la pendiente b :

$$a = \ln K_{Isokin} \quad (15)$$

$$b = \frac{1}{RT_{Isokin}} \quad (16)$$

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1.1 Efecto de la concentración de fibra sobre la tixotropía en el zumo de manzana

Algunos fluidos de frutas muestran tixotropía, que se define como la disminución continua de la viscosidad aparente con el tiempo de cizallamiento y una recuperación de esta viscosidad una vez que se detiene la velocidad de cizallamiento (Lozano y Ibarz, 1994). La respuesta tixotrópica de un fluido puede determinarse a través de la medición del esfuerzo cortante en función del tiempo a una velocidad de deformación dada que permanece constante durante la prueba instrumental. La temperatura y la concentración ejercen influencia significativa sobre la tixotropía y en general su aumento puede desplazar y disminuir un comportamiento tixotrópico y eventualmente desaparecer (Otero *et al.*, 1989).

Los parámetros tixotrópicos del ajuste del modelo Figoni-Shoemaker, al igual que los coeficientes de determinación para las condiciones de trabajo estudiadas se muestran en la Tabla 3. En todos los casos, tanto los ajustes como los resultados estimados de los parámetros (σ_0 , σ_e , y k) resultaron significativos en un nivel de confianza del 95%. El modelo Figoni-Shoemaker permite describir el comportamiento tixotrópico en una constante cinética de degradación de la estructura interna del zumo de manzana. Este modelo permite cuantificar el rompimiento de la estructura ($\sigma_0 - \sigma_e$) y cuantificar el esfuerzo cortante del equilibrio en Pa (σ_e) y k las constantes cinéticas de degradación de la estructura (s^{-1}). El zumo de manzana clarificado y despectinizado listo para beber con 12,5 Brix y 0% contenido de fibra mostro un comportamiento de flujo Newtoniano. Con la adición de 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14% y 16% de fibra de manzana se observó que no sólo la consistencia cambió, sino que también la viscosidad aparente aumentó al aumentar la concentración, adicionalmente se muestra la cantidad de estructura destruida

cuando las muestras superaron el 10% de contenido de fibra mostrando un comportamiento tixotrópico.

Para las concentraciones estudiadas del zumo de manzana se observa que el parámetro que representa la medida del esfuerzo cortante de equilibrio aumenta de forma progresiva a medida aumenta el contenido de fibra. Los valores del esfuerzo cortante del equilibrio (σ_e) indican que la tixotropía tiene una magnitud importante en el zumo de manzana y que va a influir en las características del flujo, en específico a las muestras con mayor contenido de fibra de manzana. También se puede observar que el valor de la constante de k disminuye a medida aumenta la concentración de fibra. Resultados similares fueron determinados en estudios de tixotropía, Cepeda *et al.*, 1999, por ejemplo, determinó en un estudio de zumo de *Malus Floribunda*, que a medida aumenta la concentración de sólidos totales también aumentan los valores de esfuerzo cortantes, y que a medida estos sólidos aumentaban, la constante de k decrece. También Lozano e Ibarz (1997), observaron el mismo comportamiento en los parámetros tixotrópicos a medida aumentaba el contenido de sólidos.

Tabla 3. Valores de los parámetros reológicos del Modelo Figoni-Shoemaker en función del porcentaje de fibra y temperatura a una velocidad de cizalla de 100 s⁻¹

Cf	T	$\sigma_0 - \sigma_e$				
%	°C	k (s ⁻¹)	σ_0 (Pa)	σ_e (Pa)	(Pa)	R ²
16	5	0,009±0.0002	45,45 ±0.06	27,96±0.03	17,49	0,9440
16	15	0,009±0.0005	44,60±0.02	28,00±0.06	16,60	0,9733
16	30	0,007±0.0007	16,98±0.07	9,35±0.06	7,63	0,9520
16	45	0,007±0.0009	25,40±0.24	18,34±0.14	7,06	0,9820
16	60	0,014±0.0003	10,15±0.02	5,98±0.03	4,17	0,9710

14	5	0,007±0.0005	38,66±0.05	18,62±0.02	20,04	0,9725
14	15	0,008±0.0002	32,76±0.05	16,71±0.03	16,06	0,9689
14	30	0,009±0.0003	23,95±0.09	12,82±0.02	8,58	0,9880
14	45	0,012±0.0005	26,93±0.07	15,37±0.02	11,56	0,9901
14	60	0,014±0.0005	20,22±0.02	9,31±0.03	10,91	0,9968
12	5	0,006±0.0002	9,22±2.15	5,78±1.88	3,44	0,9322
12	15	0,006±0.0005	14,55±0.01	6,56±0.03	7,99	0,9900
12	30	0,008±0.0005	11,52±1.13	5,24±0.09	6,28	0,9629
12	45	0,014±0.0009	12,09±0.06	4,75±0.03	7,34	0,9872
12	60	0,011±0.0009	10,85±0.02	4,92±0.01	5,93	0,9770
10	5	0,006±0.0002	4,13±0.05	2,93±0.03	1,20	0,9814
10	15	0,005±0.0003	3,80±0.62	2,74±0.06	1,06	0,9734
10	30	0,006±0.0005	4,65±0.82	2,57±0.07	2,08	0,9620
10	45	0,007±0.0003	4,48±0.07	2,32±0.02	2,16	0,9203
10	60	0,007±0.0002	2,88±0.07	1,54±0.02	1,34	0,9410

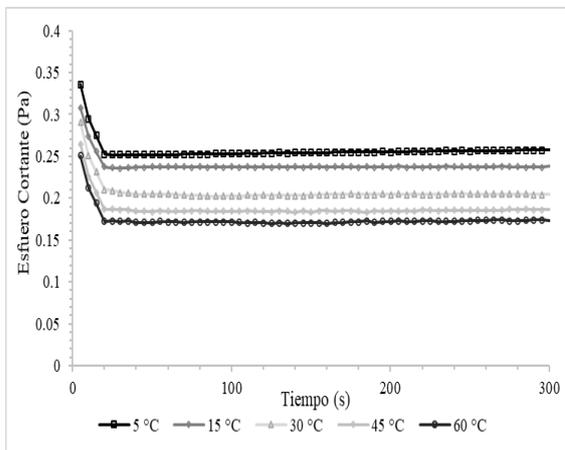
5.1.3 Efecto de la temperatura sobre la tixotropía del zumo de manzana

El incremento en la temperatura como se puede observar en el Tabla 3., causó un decrecimiento en el esfuerzo contante inicial (σ_0), en el esfuerzo cortante del equilibrio (σ_e) y en su diferencia ($\sigma_0 - \sigma_e$), mostrando que un incremento en la temperatura disminuye la cantidad de la estructura degrada durante el cizallamiento. Adicionalmente la constante cinética de destrucción estructural (k) se incrementa cuando la temperatura aumenta. Estos resultados indican que un aumento de la temperatura facilita la destrucción de la estructura y, además, se lleva a cabo a una mayor velocidad.

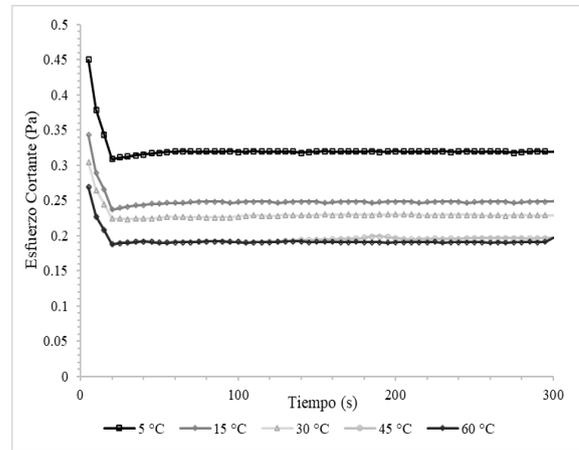
En la Figura 6., se ha representado de forma gráfica la variación del esfuerzo cortante con el tiempo para la velocidad de deformación de 100 s^{-1} . Para el zumo de

manzana (0-8% cf) a diferentes temperaturas se observa la gran influencia que la temperatura ejerce en el carácter tixotrópico del zumo de manzana. También se puede observar para todas las condiciones, que el esfuerzo cortante obtenido experimentalmente a una velocidad de deformación fija es sensible al tiempo de deformación, especialmente en los primeros 20 segundos, donde el esfuerzo cortante baja rápidamente con el tiempo de deformación y por lo tanto las muestras de 2-8% cf presentan características tixotrópicas.

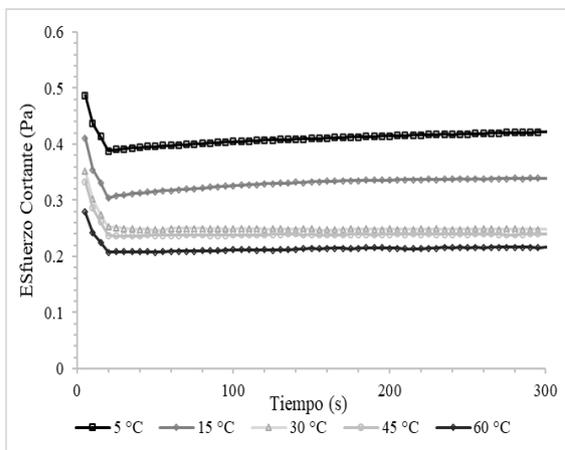
(a)



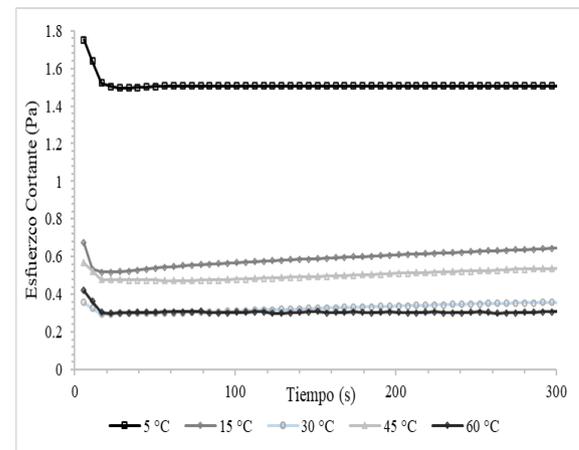
(b)



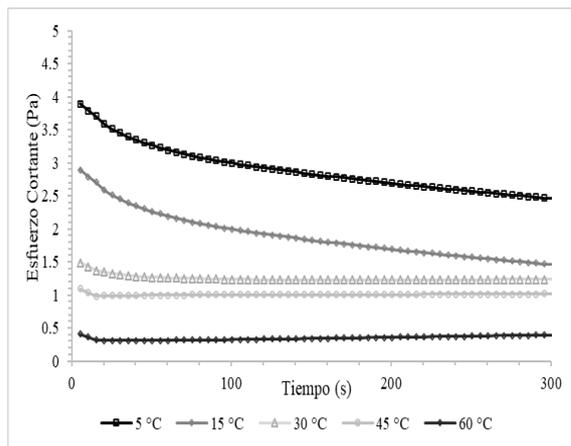
(c)



(d)



(e)

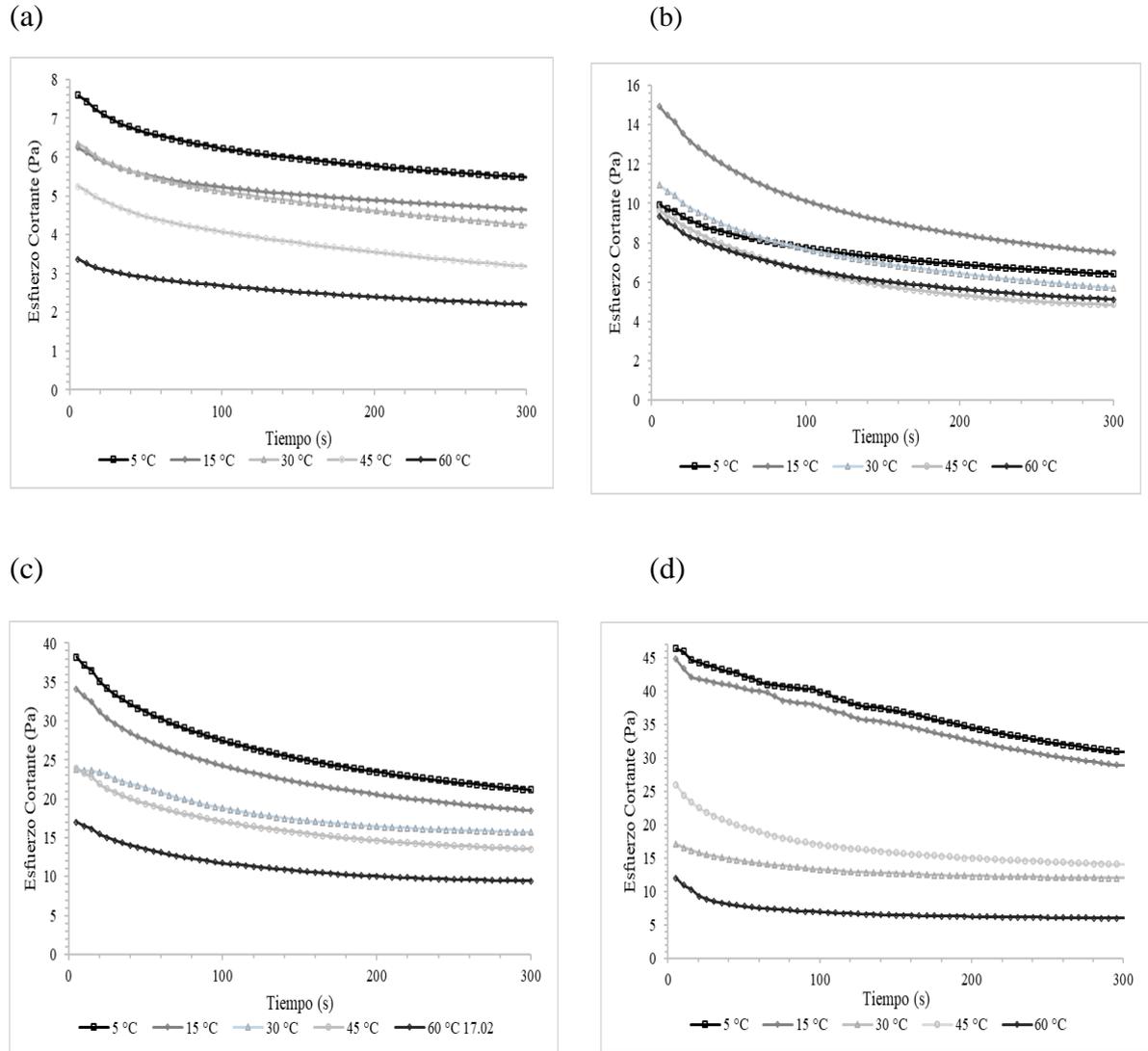


- (a) disolución al 0%
- (b) disolución al 2%
- (c) disolución al 4%
- (d) disolución al 6%
- (e) disolución al 8%

Figura 6. Variación del esfuerzo cortante con el tiempo para el zumo de manzana de 0 a 8 % de fibra a diferentes temperaturas. Modelo Figoni Shoemaker.

En los tixogramas de 10% a 16% de fibra se puede observar un incremento en el comportamiento tixotrópico a medida aumenta la concentración y disminuye la temperatura. Los valores de k , disminuyen a medida aumenta la cantidad de fibra. Estos valores representan que la velocidad de destrucción estructural es mayor en las muestras con menor porcentaje de fibra añadida. En la Figura 7, se observa que a medida que aumenta la cantidad de fibra y disminuye la temperatura, los valores del esfuerzo cortante de equilibrio σ_e también aumentan, lo que significa que presentarían una viscosidad aparente mayor. Por otro lado, a medida que aumenta la temperatura el esfuerzo cortante de equilibrio decrece, lo que significa que las muestras mostrarán menor viscosidad aparente a medida la temperatura aumenta. La diferencia $\sigma_0 - \sigma_e$ es una medida de la cantidad de estructura degradada por el cizallamiento. Los valores obtenidos para la muestra las muestras 10-16% Cf indican que la magnitud de tixotropía a esas concentraciones es considerable. Resultados similares han sido identificados por Ibarz y

Lozano (1992) en pulpas concentradas de ciruela y melocotón por Alonso *et al.*, (1995) en comida para bebés.



- (a) disolución al 10%
- (c) disolución al 12%
- (d) disolución al 14%
- (e) disolución al 16%

Figura 7. Variación del esfuerzo cortante con el tiempo para el zumo de manzana de 10 a 16% de fibra a diferentes temperaturas.

5.1.4 Comportamiento al flujo zumo de manzana con fibra

En las siguientes Figuras 8-12, se pueden observar los diferentes reogramas y la línea correspondiente al modelo Herschel-Bulkley ajustado en cada caso, cuyos parámetros aparecen en la Tabla 4. Se observa en los reogramas un aumento de la consistencia de la muestra a medida aumenta el contenido de fibra y la temperatura disminuye. Analizando la representación gráfica de los resultados obtenidos del zumo de manzana entre la variación del esfuerzo cortante (σ) y la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$), a las diferentes concentraciones y temperaturas estudiadas, se observa una curva de comportamiento de fluido newtoniano para los reogramas de 0 a 8% de contenido de fibra a todas las temperaturas. También se observa que, para las distintas temperaturas ensayadas, los valores que alcanza el esfuerzo cortante se hacen mayores a medida que aumenta la velocidad de deformación. Haciendo una comparación entre cada uno de los reogramas de 0 a 8% contenido de fibra, se puede apreciar que, para la misma temperatura y velocidad de deformación, el esfuerzo cortante aumenta al aumentar la concentración de fibra.

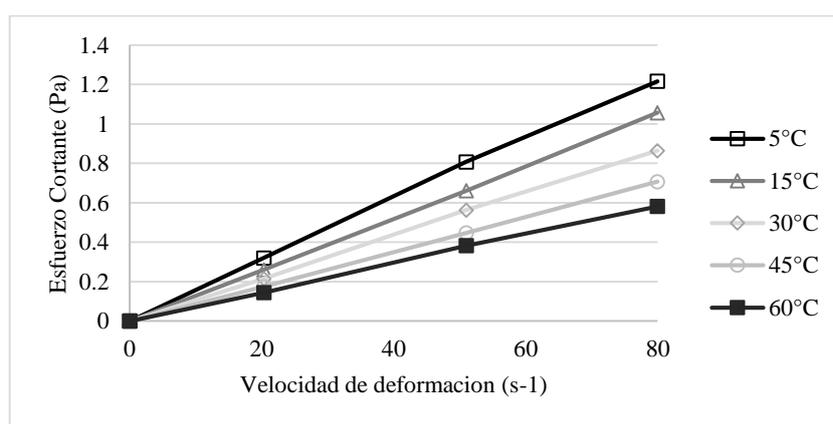


Figura 8. Reogramas para zumo de manzana a concentración de 0% de fibra a todas las temperaturas.

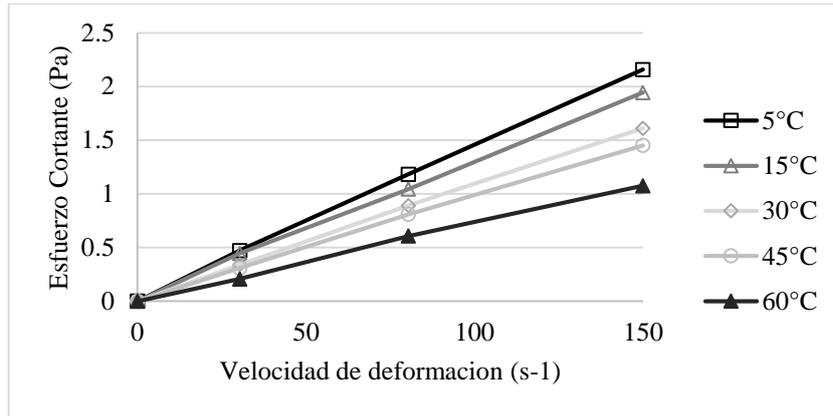


Figura 9. Reograma para zumo de manzana a concentración de 2% de fibra a todas las temperaturas.

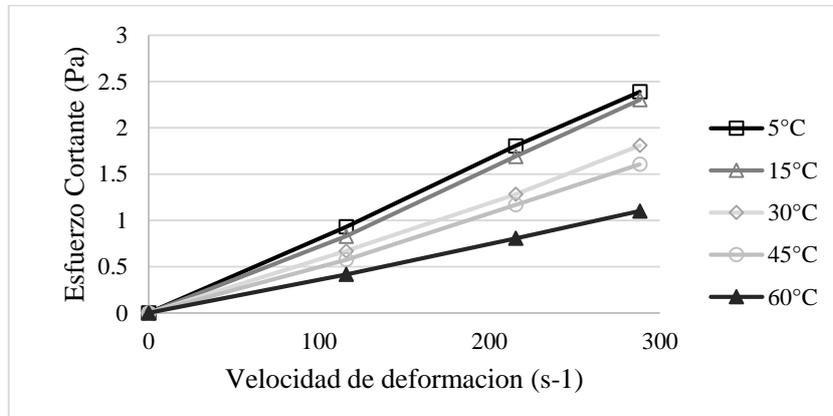


Figura 10. Reograma para zumo de manzana a concentración de 4% de fibra a todas las temperaturas.

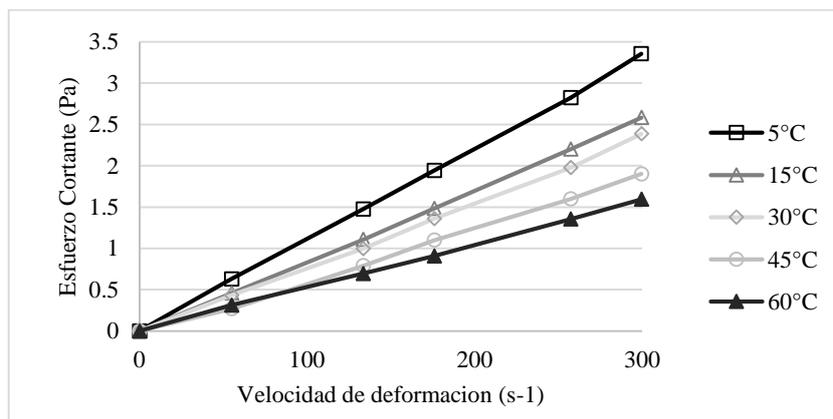


Figura 11. Reograma para zumo de manzana a concentración de 6% de fibra a todas las temperaturas.

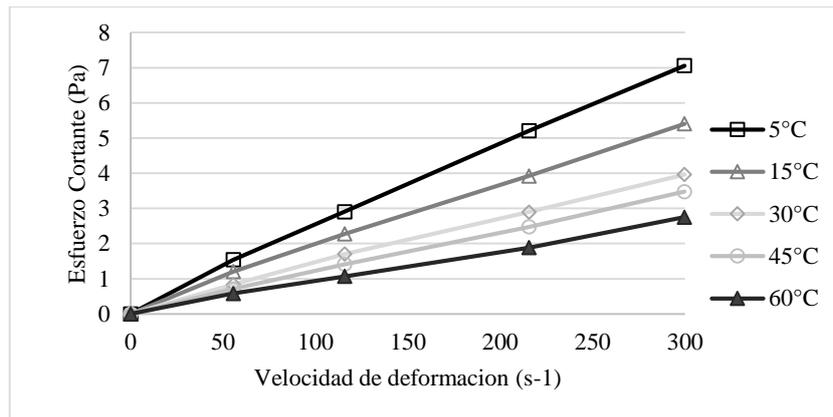


Figura 12. Reograma para zumo de manzana a concentración de 8% de fibra a todas las temperaturas.

Con el fin de describir de manera más precisa el comportamiento al flujo del zumo de manzana se han llevado a cabo los mismos análisis sobre diluciones con un mayor contenido, concretamente de 10, 12, 14 y 16 % Cf (Figuras 13-16). Los ensayos han sido realizados en el de temperatura de 5 a 60 °C. Los reogramas obtenidos no corresponden a una línea recta que pasa por el origen de coordenadas como en el caso de un fluido newtoniano, sino a una curva característica de un fluido pseudoplástico (o de Herschel-Bulkley). Las figuras de los datos experimentales del zumo de manzana con una concentración de fibra de a 10 y 12% presentan forma similar a los reogramas de los fluidos pseudoplástico, es decir que el esfuerzo cortante aumenta potencialmente con la velocidad de deformación. Por otro lado, la muestra de zumo de manzana con 14 y 16% Cf se comporta como un fluido Herschel-Bulkley. Por otra parte, también se puede observar claramente que, a temperatura más baja, el esfuerzo cortante aumenta más rápidamente con el incremento del gradiente de velocidad.

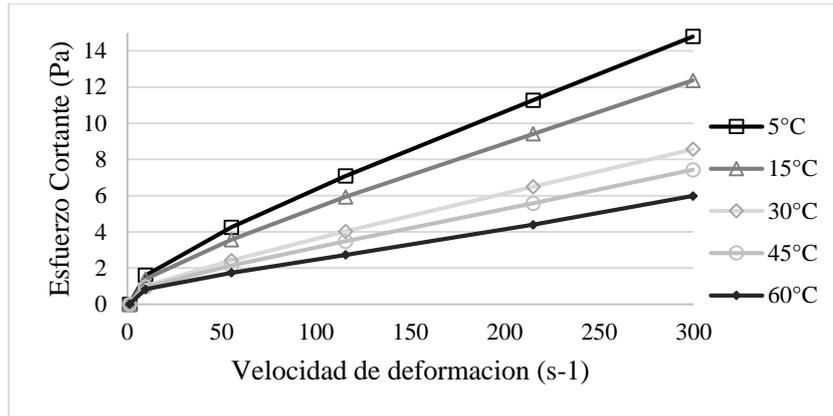


Figura 13. Reograma para zumo de manzana a concentración de 10% de fibra a todas las temperaturas.

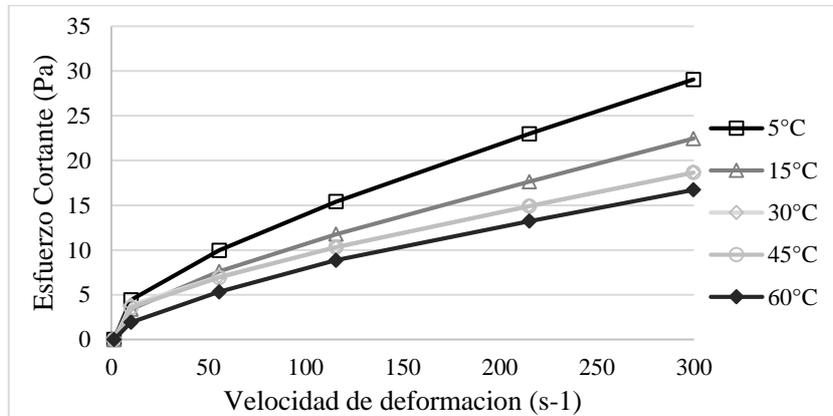


Figura 14. Reograma para zumo de manzana a concentración de 12% de fibra a todas las temperaturas.

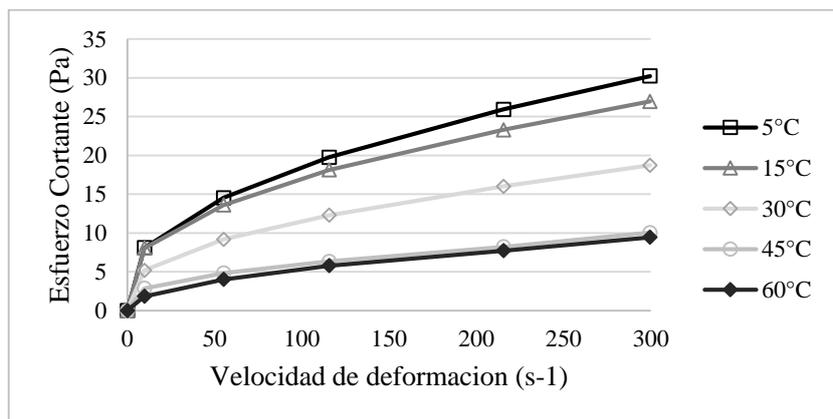


Figura 15. Reograma para zumo de manzana a concentración de 14% de fibra a todas las temperaturas.

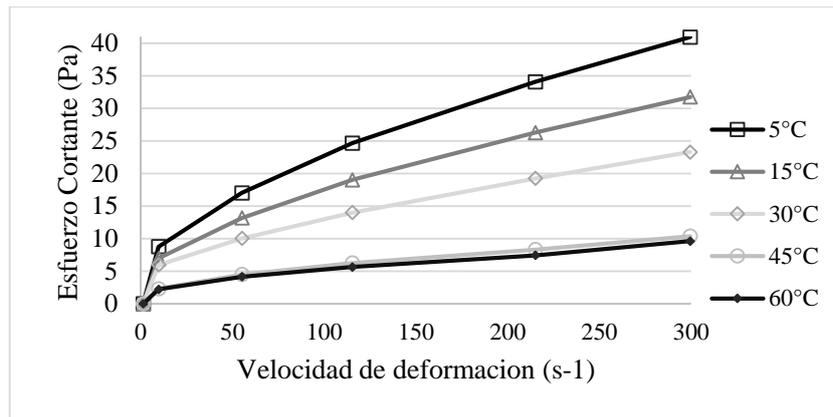


Figura 16. Reograma para zumo de manzana a concentración de 16% de fibra a todas las temperaturas.

Se obtuvieron los parámetros reológicos (σ_0), (k) y (n) para el zumo de manzana mediante una regresión no lineal, donde se obtienen los valores de pendiente e intercepto de la ecuación, mismos que corresponden al índice de comportamiento de flujo (n), índice de consistencia (k) y umbral de fluencia (σ_0) respectivamente. El parámetro índice de comportamiento al flujo indica el grado de desviación con relación al comportamiento newtoniano que presentan los fluidos, cuando es menor que 1, el fluido es pseudoplástico o de Herschel-Bulkley. El índice de consistencia k expresado en $(\text{Pa}\cdot\text{s}^n)$, indica cómo se interrelacionan los compuestos en el producto. Por último, el umbral de fluencia indica el esfuerzo requerido para iniciar el flujo o esfuerzo de fluencia, dependiendo precisamente de la composición, distribución y características de las partículas suspendidas en la muestra.

Tabla 4. Valores para los parámetros del modelo Herschel-Bulkley ($0.1 \text{ s}^{-1} < \dot{\gamma} < 300$

s^{-1} , con promedio de tres replicas \pm desviación standard).

Fibra (%)	Temperatura (°C)	σ_0 (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n	R ²	Comportamiento Reológico
0	60	0,000±0,000	0,0008±0,00022	1,000±0,000	0,9373	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,0012±0,00018	1,000±0,000	0,9029	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,0014±0,00007	1,000±0,000	0,9285	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,0015±0,00016	1,000±0,000	0,9654	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,0022±0,00023	1,000±0,000	0,9834	Newtoniano
2	60	0,000±0,000	0,0021±0,00005	1,000±0,000	0,9790	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,0024±0,00006	1,000±0,000	0,9808	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,0024±0,00016	1,000±0,000	0,9914	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,0034±0,00006	1,000±0,000	0,9945	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,0036±0,00024	1,000±0,000	0,9941	Newtoniano
4	60	0,000±0,000	0,0033±0,00018	1,000±0,000	0,9902	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,0033±0,00004	1,000±0,000	0,9891	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,0039±0,00068	1,000±0,000	0,9784	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,0042±0,00055	1,000±0,000	0,9872	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,0045±0,00035	1,000±0,000	0,9894	Newtoniano
6	60	0,000±0,000	0,0035±0,00006	1,000±0,000	0,9877	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,0036±0,00025	1,000±0,000	0,9925	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,0042±0,00021	1,000±0,000	0,9956	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,0054±0,00043	1,000±0,000	0,9956	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,0087±0,00046	1,000±0,000	0,9990	Newtoniano
8	60	0,000±0,000	0,0031±0,00104	1,000±0,000	0,9957	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,0058±0,00014	1,000±0,000	0,9915	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,0065±0,00114	1,000±0,000	0,9993	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,0091±0,00373	1,000±0,000	0,9962	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,0122±0,00512	1,000±0,000	0,9998	Newtoniano
10	60	0,000±0,000	0,0162±0,00887	1,000±0,000	0,9991	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,0235±0,01676	0,970±0.073	0,9995	Ley Potencia
	30	0,000±0,000	0,0288±0,02465	0,955±0.081	0,9997	Ley Potencia
	15	0,000±0,000	0,0823±0,01714	0,901±0.064	0,9998	Ley Potencia
	5	0,000±0,000	0,0913±0,03167	0,899±0.070	0,9998	Ley Potencia
12	60	0,000±0,000	0,0742±0,01132	0,778±0.241	0,9978	Ley Potencia
	45	0,000±0,000	0,1010±0,00000	0,750±0.268	0,9995	Ley Potencia
	30	0,000±0,000	0,2513±0,01215	0,753±0.205	0,9988	Ley Potencia
	15	0,000±0,000	0,2721±0,02853	0,714±0.218	0,9996	Ley Potencia
	5	1,594±0.423	0,2821±0,01118	0,719±0.153	0,9995	Ley Potencia
14	60	2,564±0.122	0,5248±0,02381	0,681±0.033	0,9993	Herschel-Bulkley
	45	2,443±0.860	0,6496±0,03519	0,646±0.027	0,9996	Herschel-Bulkley
	30	2,345±0.792	0,8938±0,02349	0,620±0.017	0,9998	Herschel-Bulkley
	15	2,149±0.815	1,4094±0,06956	0,603±0.007	0,9987	Herschel-Bulkley
	5	2,272±0.190	1,6482±0,07929	0,592±0.018	0,9994	Herschel-Bulkley
16	60	46,060±0.707	9,4981±0,0700	0,464±0.005	0,9995	Herschel-Bulkley
	45	53,285±1.414	13,776±0,0707	0,424±0.002	0,9994	Herschel-Bulkley
	30	55,385±4.642	16,680±0,0591	0,412±0.004	0,9996	Herschel-Bulkley
	15	55,431±3.944	20,885±0,6852	0,399±0.007	0,9992	Herschel-Bulkley
	5	61,495±6.215	28,043±1,8360	0,377±0.001	0,9999	Herschel-Bulkley

El comportamiento reológico de los zumos de manzana con fibra en sus concentraciones (0 – 16%) se describen con el modelo Herschel-Bulkley, ya que los coeficientes de correlación obtenidos para las muestras fueron mejores que los correspondientes a otros modelos. Las disoluciones de fibra son sistemas de dos fases compuestos por partículas sólidas dispersas en un medio acuoso. La variabilidad en el comportamiento reológico está relacionada con la alteración estructural que provoca el cizallamiento. Las disoluciones de azúcares en el zumo de manzana tienen carácter newtoniano. Las partículas en suspensión hacen que aparezca un umbral de fluencia en las disoluciones del zumo de manzana comportándose como un fluido pseudo-plástico, siendo este mayor, a medida que aumente la cantidad de fibra en suspensión.

La pseudo-plasticidad del zumo se puede medir por el índice de comportamiento al flujo (n), el cual decrece cuando la pseudo-plasticidad aumenta. En la Tabla 4., se observa que las muestras de zumo de manzana que presentaron un comportamiento pseudo-plástico, el índice de comportamiento al flujo disminuyó al aumentar la concentración de fibra. El índice de comportamiento al flujo también es dependiente de la temperatura, ya que los valores de n disminuyen a medida que decrece la temperatura. Este mismo hecho se ha observado en un estudio de zumo de melocotón con fibra añadida (Augusto *et al.*, 2011).

Adicionalmente, se observó que el índice de consistencia (k) aumentó con la concentración y disminuyó con el aumento de la temperatura. La adición de fibra en el zumo de manzana no implicó necesariamente un cambio de comportamiento de newtoniano a no newtoniano; sin embargo, al superar el valor límite de concentración (10% cf), el zumo cambia su comportamiento de un fluido newtoniano a un fluido pseudoplástico. El modelado del umbral de fluencia (σ_0) no mostró una tendencia clara en cuanto a su comportamiento, esto debido a que su comportamiento usualmente es el menos

pronunciado. En algunos casos este parámetro suele ser constante, como se mostró en el estudio de puré de durazno (Massa *et al.*, 2010), mientras que, en otros estudios, este comportamiento muestra una caída significativa con los cambios de temperatura como en el estudio de pulpa de butiá (Haminiuk *et al.*, 2006). Sin embargo, algunos productos muestran a este parámetro como un comportamiento no identificable, como por ejemplo en el estudio de puré de papa (Canet *et al.*, 2005).

5.1.5 Efecto de la temperatura sobre el comportamiento al flujo

Para cuantificar el efecto que la temperatura ejerce sobre la consistencia de cada fluido, las estimaciones de viscosidad para los modelos newtonianos y el índice de consistencia para los modelos no newtonianos se ajustaron a una ecuación de tipo Arrhenius (Ecuación 7), obteniendo un par de estimaciones para $\ln k_0$ y E_a para cada contenido de fibra. La Tabla 5 muestra estos parámetros ajustados de Arrhenius obtenidos de los modelos Newton, Ley de la potencia y Herschel-Bulkley, previamente ajustados para 0-8%, 10-12% y 14-16% de contenido de fibra, respectivamente. Como todos los coeficientes de determinación fueron siempre superiores a 0,85 y todos los valores de p claramente inferiores a 0,05, se concluyó que la ecuación de Arrhenius (Ecuación 7) describe adecuadamente el efecto de la temperatura en la consistencia del zumo, independientemente del modelo reológico. Los valores obtenidos para la energía de activación son similares a los obtenidos en otros sistemas (Garvín *et al.*, 2017).

Tabla 5. Parámetros de la ecuación Arrhenius para el zumo de manzana

Fibra (%)	E_a (kJ/mol)	$\ln k_0$	R^2	k_0 (mPa.s ⁿ)
0	12,17	-4,54E+00	0,9160	1,07E-02
2	7,87	-2,25E+00	0,9330	1,06E-01
4	4,74	-5,46E-01	0,9466	5,79E-01
6	12,12	-3,25E+00	0,8612	3,87E-02
8	17,42	-5,03E+00	0,9455	6,57E-03
10	26,04	-6,70E+00	0,9413	1,23E-03
12	20,17	-2,88E+00	0,8532	5,63E-02
14	16,87	1,34E-01	0,9898	1,14E+00
16	14,09	4,12E+00	0,9804	6,17E+01

En la Tabla 5 se observa que la constante k_0 presenta valores bajos y aumenta con el aumento de la concentración. Para la energía de activación se observan valores similares; sin embargo, se puede observar un incremento considerable de la E_a , a partir del 8% de contenido de fibra, lo que indica que la viscosidad está más influenciada por la temperatura a concentraciones elevadas de fibra. Los valores de energía de activación obtenidos para el zumo de manzana variaron de 4,74 (kJ/mol) para la concentración de 4% de fibra a 26,04 (kJ/mol), para la concentración de 10%, 20,17 (kJ/mol), 16,87 (kJ/mol) y 14,09 (kJ/mol) para los contenidos de fibra de 12%, 14% y 16% respectivamente. Valores similares se han obtenido en estudios previos para zumo clarificado de naranja, en la investigación de Ibarz *et al.*, (2009), adicionalmente, Grigelmo *et al.*, (1999), reportó en un estudio de fibra dietética de naranja en suspensión,

en los que considerable el intervalo de fibra de 7% a 20%, obteniendo un intervalo de valores entre 3,1 – 13,8 kJ/mol.

5.1.6 Efecto de la concentración sobre el comportamiento al flujo

El efecto de la concentración en el comportamiento reológico del zumo de manzana con fibra añadida puede describirse por un modelo potencial (ecuación 9) y por un modelo exponencial (ecuación 8). Para obtener los valores estimados de los modelos anteriores se han ajustado los datos experimentales al tipo de ecuaciones citadas. El mejor ajuste se ha obtenido con el modelo exponencial, ya que presenta valores de coeficientes de determinación más elevados. De este modo, para este estudio únicamente se presentan los ajustes a este modelo.

Tabla 6. Influencia del contenido de fibra en la consistencia (índice de consistencia o viscosidad) a cada temperatura. $k = a_1 \exp(b_1 C)$

Temperatura (°C)	a_1 (mPa·s ⁿ)	b_1 (% ⁻¹)	R^2
5	0,3028	0,6226	0,9125
15	0,2570	0,6199	0,9070
30	0,1948	0,6118	0,8866
45	0,1897	0,5859	0,8649
60	0,1743	0,5566	0,9386

Se puede observar en la Tabla 6, que el parámetro a_1 , el cual indica el grado de influencia de la concentración sobre la viscosidad aparente, disminuye a medida la temperatura

aumente, lo que indica que la incidencia de la concentración será mayor a temperaturas más bajas. Asimismo, este comportamiento se registra con el parámetro b_1 , el cual disminuye a medida aumenta la temperatura, lo que indica que el efecto de la concentración es más pronunciado cuando los valores de temperatura son más bajos. Tendencias similares tienen ha sido observado en otros estudios (Rao *et al.* 1984; Ibarz *et al.* 1992, 1994, 1996).

5.1.7 Compensación Cinética

Tomando los parámetros de la ecuación de Arrhenius de la Tabla 5. Se elaboró la Figura 18, en donde se muestra la dependencia de $\ln k_0$ de la energía de activación (E_a) cuando el contenido de fibra varía, mostrando dos líneas rectas diferentes, una para los parámetros obtenidos del modelo de Newton para el contenido de fibra del 2 al 8%, y otra para los parámetros obtenidos de la ley de potencia y los modelos Herschel-Bulkley del 10 al 16% del contenido de fibra. Por lo tanto, se concluyó la existencia de una compensación en la consistencia del jugo de manzana para diferentes contenidos de fibra. Dado que las dos líneas rectas eran claramente diferentes, se concluyó un mecanismo de flujo de fluido diferente para cada línea recta, es decir, uno para el 2 al 8% y otro para el intervalo del 10 al 16% del contenido de fibra.

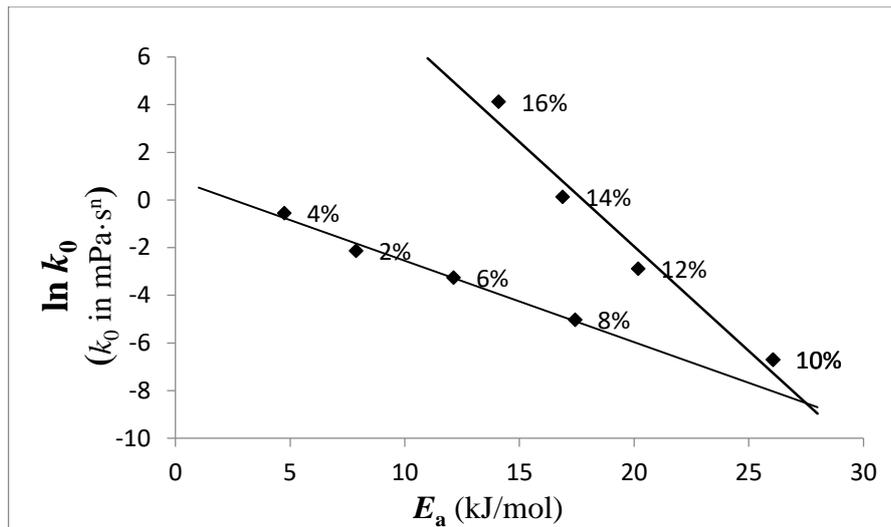


Figura 17. Compensación cinética zumo de manzana con fibra añadida

La existencia de cada línea recta implica que la variable ambiental, en este caso el contenido de fibra no cambia el mecanismo de flujo para todo el rango de valores del contenido de fibra para el cual la relación es una línea recta.

Por lo tanto, cuando el contenido de fibra aumenta, a un valor del 10% no solo el modelo reológico cambió de modelo newtoniano a no newtoniano, sino que también cambió el mecanismo del flujo. Este valor de contenido de fibra específico del 10% no sigue la línea recta correspondiente al modelo de Newton, pero está claramente cerca de él. Aunque el parámetro k cambia de la viscosidad para el modelo de Newton al índice de consistencia para los modelos no newtonianos, debido al hecho de que el modelo de Newton está incluido en el modelo de Herschel-Bulkley, tanto la viscosidad como el índice de consistencia son física y matemáticamente comparables. Entonces, al comparar ambas líneas rectas, el mecanismo de flujo aparentemente cambia para un contenido de fibra entre 8 y 10%.

Los datos en la Tabla 5. se ajustaron a la Ecuación 16, encontrando las dos líneas rectas que se muestran en la Figura 17. La Tabla 7 muestra las estimaciones y los intervalos de confianza para ambos parámetros y cada modelo.

Tabla 7. Parámetros de la compensación cinética

			Newtoniano	No- Newtoniano
Contenido de fibra (g/100g)			0-8	10-16
T_{iso} (°C)	Valor		78,9	-135,9
	Intervalo de confianza	de	-5,1 a 239,7	-185,6 a -43,4
$\ln(k_{T_{iso}})$	Valor		0,855	15,6
	Intervalo de confianza	de	-0,39 a 2,10	5,72 a 25,5
R^2			0,9858	0,9665
Valor-P			0,007	0,0169

Las Figuras 18 y 19 muestran el hecho de que, según la teoría de compensación, el valor del coeficiente de consistencia o la viscosidad sería el mismo que la temperatura de iso-consistencia para cada modelo. Estas figuras muestran los valores extrapolados en función de la temperatura, considerando que el comportamiento sería el mismo que el encontrado para el intervalo de temperaturas estudiadas. La Figura 18 muestra cómo el logaritmo neperiano de la viscosidad expresada en mPa·s se aproxima al mismo valor (0,855) a la misma temperatura (79,6°C) para cada jugo de manzana con contenido de fibra de hasta 8%. La Figura 19 muestra cómo el logaritmo neperiano del índice de consistencia expresado en mPa·sⁿ se aproxima al mismo valor (15,6) a la misma temperatura (-135,9°C) para cada jugo de manzana con contenido de fibra del 10 al 16%.

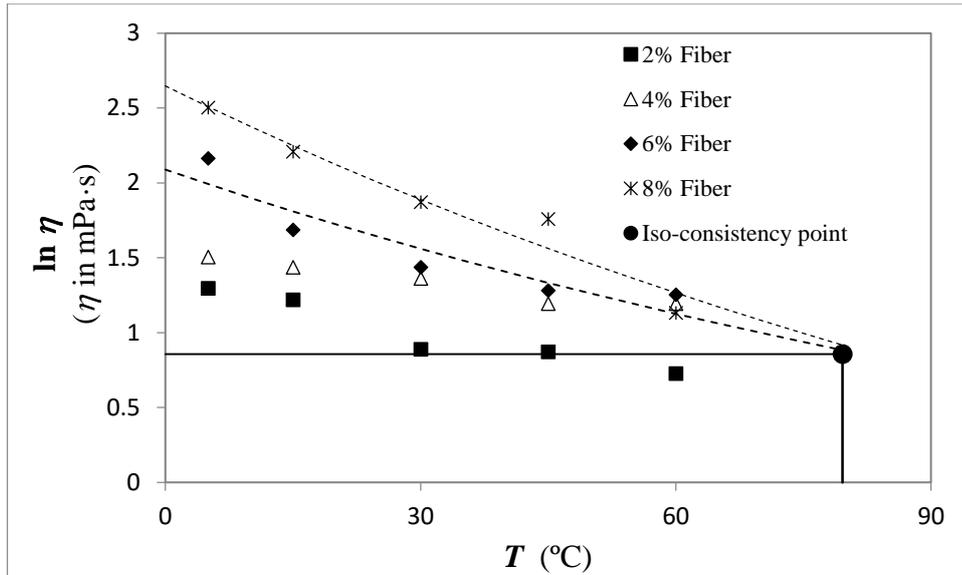


Figura 18. Tendencia de la viscosidad al punto de iso-consistencia para los contenidos de fibra relacionados con el modelo de Newton (<8%).

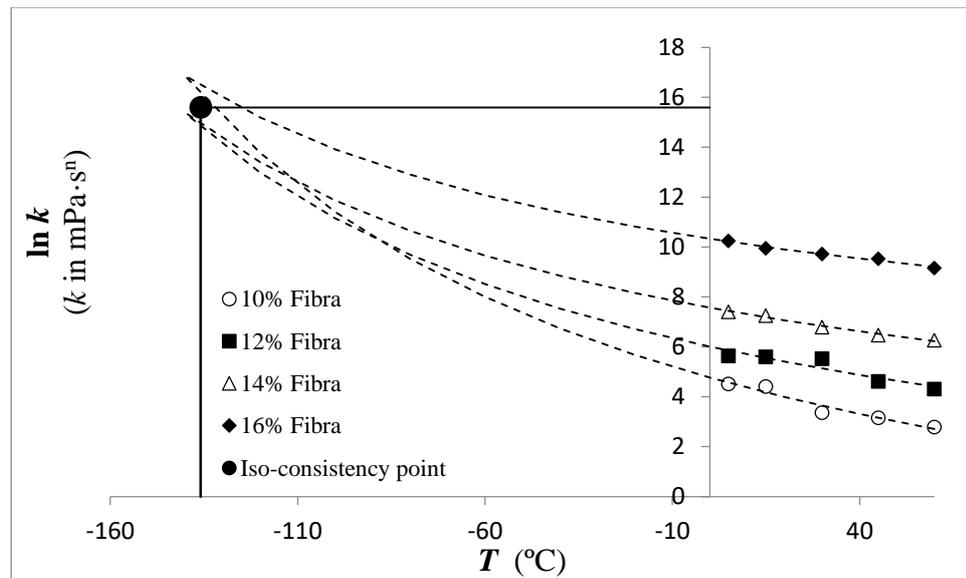


Figura 19. Tendencia del índice de consistencia al punto de iso-consistencia para los contenidos de fibra relacionados con los modelos No-Newtonianos (10-16%).

Estas temperaturas a las cuales la viscosidad o los valores del coeficiente de consistencia son los mismos independientemente del contenido de fibra que se llama temperaturas de iso-consistencia. Obviamente, la temperatura de iso-consistencia es solo

un concepto y en algunos casos no es posible comprobarlo experimentalmente, por ejemplo, a la temperatura de iso-consistencia (-135,9°C) encontrado para los modelos no newtonianos (10-16%) el jugo se congelaría y no fluiría.

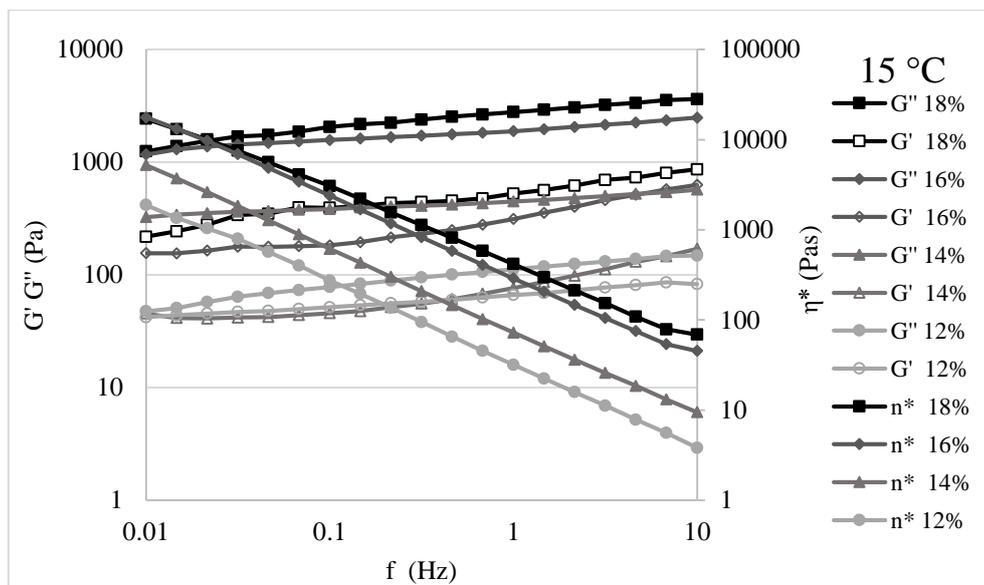
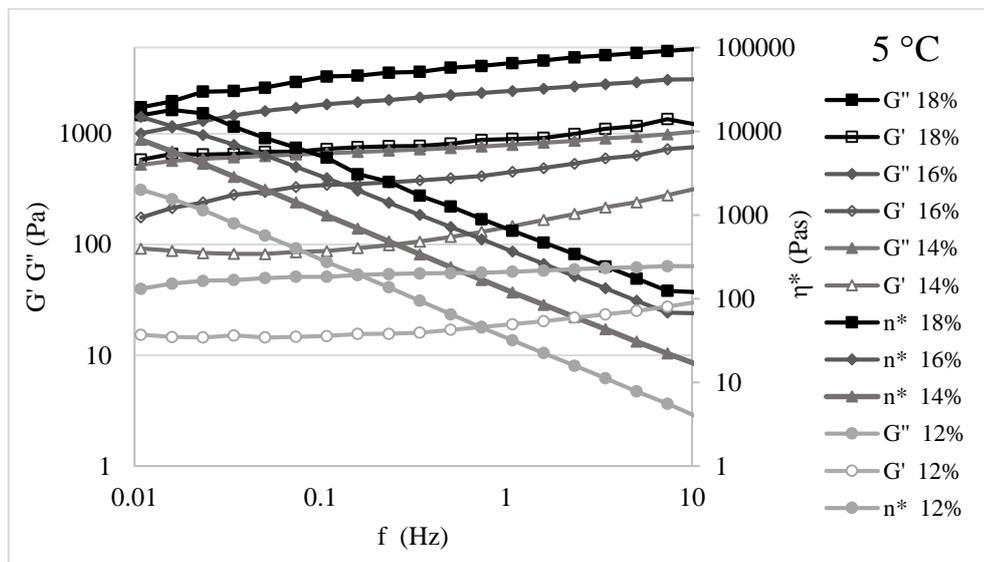
5.1.8 Caracterización de la viscoelasticidad del zumo de manzana con fibra añadida

Los resultados de los ensayos reológicos experimentales oscilatorios se expresan en término del módulo de almacenamiento (G') y del módulo de pérdida (G''). Si G' es mayor que G'' , el material alimentario exhibe un comportamiento de un semisólido. Por otro lado, si G'' es mayor que G' , el material se comporta como un semilíquido. La caracterización viscoelástica del zumo de manzana se llevó a cabo con 12, 14, 16 y 18% de fibra añadida a temperaturas de 5-60 °C.

Las mediciones de barrido de frecuencia bajo las condiciones de la respuesta viscoelástica lineal se realizaron en el intervalo de 0,01-10,00 Hz a esfuerzo cortante constante. Los módulos de almacenamiento (G'), los módulos de pérdida (G'') y la viscosidad compleja (η^*) se muestran en la Figura 20., en función de la frecuencia para todos los estudios de temperatura con 12% a 18% de fibra. En todos los experimentos, el valor de G' fue mayor que los valores de G'' a la frecuencia empleada, reportando un comportamiento de gel débil. Este comportamiento ha sido reportado por otros autores en productos con características de consistencia similares; tomate, almidón de maíz y jugo de durazno con fibra agregada (Rao y Cooley 1992; Hirashima *et al.*, 2005, Ahmed y Ramaswamy 2006 y Augusto *et al.*, 2011).

La muestra con 18% de fibra exhibió una mayor elasticidad con una mayor magnitud de G' en comparación con la G' de la muestra al 16, 14 y 12% de fibra y para ambas muestras G' y G'' aumentó con mayor frecuencia a todas las temperaturas, mientras que la viscosidad compleja disminuyó drásticamente demostrando un perfil de cizallamiento de

corte. En términos de temperatura, los módulos de almacenamiento y de pérdida demostraron una dependencia a la temperatura, disminuyendo ambos parámetros al tiempo que aumenta la temperatura. Comportamientos similares también se han observado en comida para bebés, pulpa de fruta jабoticaba y zumo de durazno con fibra agregada (Ahmed y Ramaswamy 2006, Sato y Cunha 2007, Augusto *et al.*, 2011).



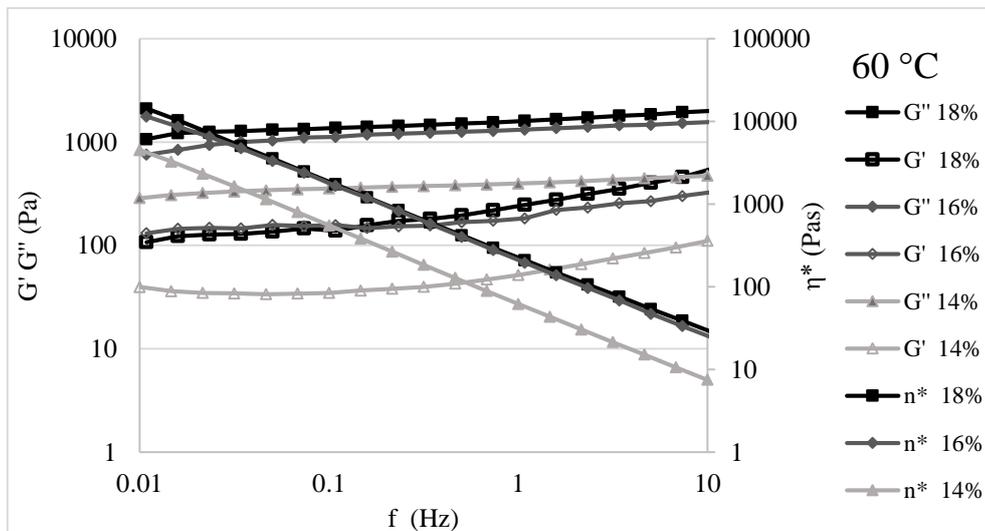
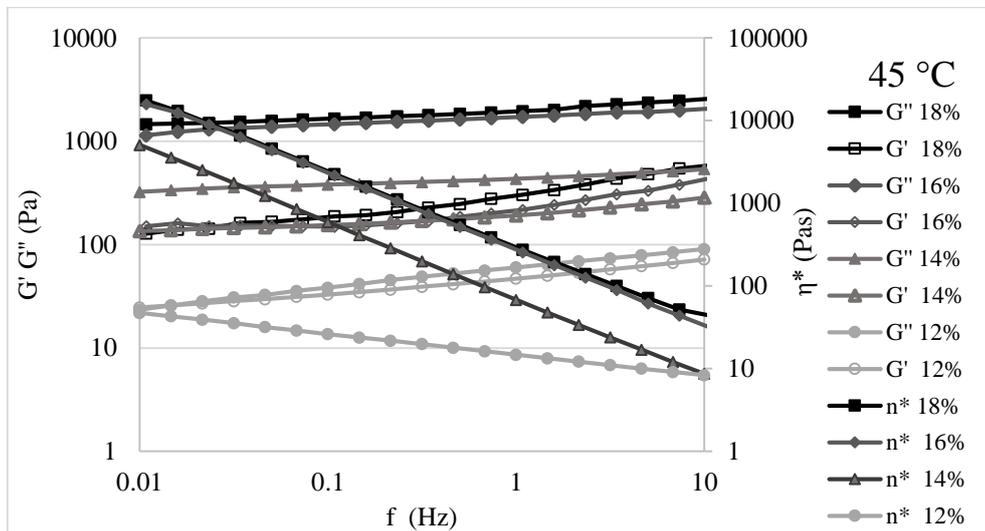
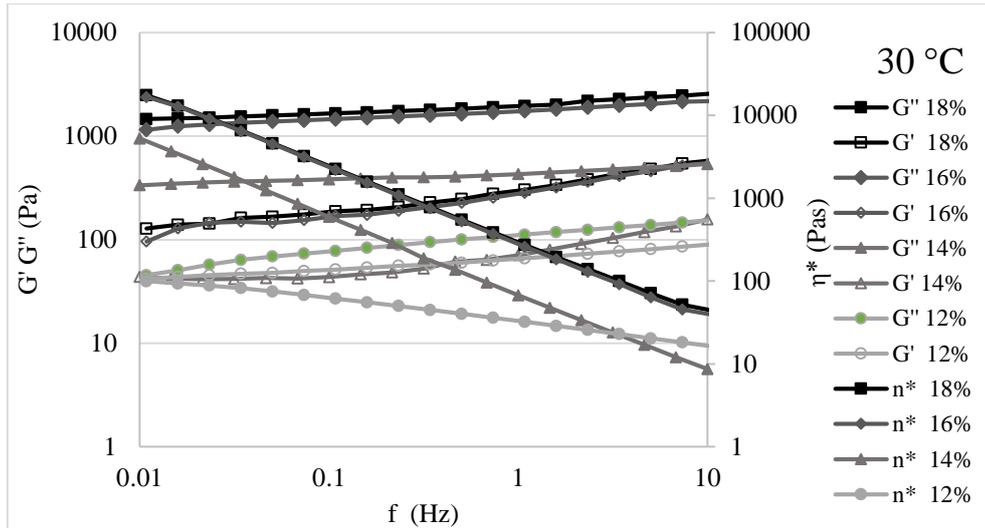


Figura 20. G' G'' y viscosidad compleja obtenida del barrido de frecuencia (0,01 a 10 Hz) para un esfuerzo cortante de 1 Pa. 18%, 16%, 14% y 12% contenido de fibra a 5 °C, 15 °C, 30 °C, 45 °C y 60 °C.

Para representar las características viscoelásticas del zumo de manzana con fibra agregada se utilizó un modelo matemático. La ecuación de tipo de ley de potencia se utilizó para verificar los datos viscoelásticos dinámicos. Las regresiones lineales del parámetro $\ln G'$ y G'' versus $\ln(\omega)$ se llevaron a cabo a cada temperatura y la magnitud de la pendiente y la intersección se analizaron con las ecuaciones 14 y 15. Los parámetros de k' , n' , k'' , n'' , son el coeficiente de regresión relacionado con G' , G'' y ω . Las regresiones de la ecuación para ambas concentraciones de fibra a diferentes temperaturas se muestran en la Tabla 8. Las muestras de 12, 14%, 16% y 18% se ajustaron a un $R^2 > 0,80$. Este coeficiente de regresión mostró que la muestra de zumo de manzana con un 18% de fibra agregada en el intervalo de temperatura exhibió un comportamiento más sólido con una mayor magnitud de k' (2848,05-1405,81 Pa·sⁿ) que k'' (386,61-161,92 Pa·sⁿ), se observó el mismo comportamiento para las demás muestras, siendo k' (2055-1122,1 Pa·sⁿ) mayor que k'' (346,6-162,3 Pa·sⁿ) para el caso del 16%, para la muestra de zumo de manzana con 14% de fibra agregada que exhibió un valor de k' (658,0-328,9 Pa·sⁿ) mayor que k'' (94,46-44,87 Pa·sⁿ) y para el 12% un valor de k' (143,1-18,9 Pa·sⁿ) mayor que k'' (48,91-15,6 Pa·sⁿ). Para los valores de n' y n'' , la muestra de jugo de manzana con 18% de fibra agregada mostró un valor de rango de 0,08-0,06 y 0,19-0,18, para la muestra 16% un valor de rango de de 0,17-0,08 y 0,21-0,12 para la muestra de 14% los valores de fibra agregada variaron entre 0,09-0,06 y 0,22 -0,16, y para 12% entre 0,12-0,34 y 0,13-0,31 que muestra que el valor de n' disminuye, mientras que n'' aumenta, afirmando que las temperaturas representan un parámetro importante para el comportamiento viscoso.

Un comportamiento similar de los parámetros k' , n' , k'' , n'' en términos de influencia de la temperatura se observa en un estudio de zumo de durazno con fibra adicional de Augusto *et al.* (2011). Ahmed y Ramaswamy (2006) han estudiado las propiedades viscoelásticas de los alimentos para bebés, los valores de k' y k'' variaron entre 384,0- 39,6 y 351,0-13,0 Pa·sⁿ, respectivamente. Los valores de n' y n'' variaron entre 0,5-0,15 y 0,10-0,26, respectivamente. Bayod *et al.* (2008), evaluaron el comportamiento viscoelástico de la salsa de tomate ketchup a temperatura ambiente. Los valores de k' y k'' 633,8-735,5 y 159,5-106,6 respectivamente y n' y n'' variaron entre 0,10-0,11 y 0,31-0,33.

Tabla 8. Parámetros de la ley de potencia para la correlación entre los módulos de almacenamiento y pérdida (G' y G''), en función de la frecuencia oscilatoria (f)

12% fibra				
G'		G''		
T (°C)	k' (Pa·s ^{n'})	n'	k'' (Pa·s ^{n''})	n''
5	143,1±31,10	0,12±0,01	48,9±7,23	0,13±0,01
15	53,6±6,81	0,12±0,01	29,0±3,41	0,17±0,01
30	47,9±6,23	0,27±0,02	28,5±2,14	0,18±0,01
45	18,9±2,14	0,34±0,07	15,6±0,82	0,31±0,02
60	--	--	--	--
14% fibra				
G'		G''		
T (°C)	k' (Pa·s ^{n'})	n'	k'' (Pa·s ^{n''})	n''
5	658,01 ± 86,25	0,09 ± 0,01	94,46 ± 8,70	0,22 ± 0,03
15	400,79 ± 16,55	0,08 ± 0,01	58,06 ± 1,93	0,23 ± 0,01
30	393,95 ± 21,75	0,06 ± 0,01	54,14 ± 2,10	0,20 ± 0,01
45	387,00 ± 17,19	0,06 ± 0,01	49,28 ± 1,37	0,18 ± 0,01
60	328,92 ± 37,09	0,06 ± 0,01	44,87 ± 2,12	0,16 ± 0,01
16% fibra				
G'		G''		
T(°C)	k' (Pa·s ^{n'})	n'	k'' (Pa·s ^{n''})	n''
5	2054,98 ± 463,98	0,17 ± 0,03	386,04 ± 88,86	0,21 ± 0,06
15	1616,24 ± 61,26	0,10± 0,01	225,17 ± 22,86	0,20 ± 0,02
30	1414,47 ± 27,39	0,08 ± 0,01	190,39 ± 8,05	0,18 ± 0,04
45	1480,43 ± 103,01	0,07 ± 0,03	175,40 ± 9,27	0,17 ± 0,02

60 1122,12 ± 71,68 0,08 ± 0,02 166,73 ± 34,43 0,12 ± 0,02				
18% fibra				
G'			G''	
T(°C)	k' (Pa·s ^{n'})	n'	k'' (Pa·s ^{n''})	n''
5	2848,0±174,70	0,07±0,01	386,6±32,45	0,19±0,04
15	2198,7±631,77	0,07±0,02	255,6±41,36	0,22±0,05
30	1984,1±322,23	0,08±0,02	254,9±10,10	0,22±0,05
45	1910,8±218,35	0,07±0,02	228,8±12,34	0,21±0,02
60	1405,8±140,00	0,07±0,02	161,9±18,30	0,18±0,03

5.2 Caracterización Reológica del zumo de limón con fibra añadida

5.2.1 Tixotropía del zumo de limón con fibra añadida

La existencia de tixotropía se manifiesta con la disminución del esfuerzo cortante en el transcurso del tiempo durante la aplicación de una velocidad de deformación constante. Las Figuras 21 y 22. muestran la variación del esfuerzo cortante con el tiempo de deformación para la muestra de zumo de limón a concentración de 12,5° Brix con un porcentaje de fibra añadida de 0 a 22% a diferentes temperaturas. Los parámetros tixotrópicos fueron ajustados al modelo Figoni-Shoemaker. En todos los casos, tanto los ajustes como los resultados estimados de los parámetros (σ_0 , σ_e , y k) resultaron significativos en un nivel de confianza de 95%. Se puede observar que, para el zumo de limón, con la adición de fibra de 2% a 22%, no solo cambia la consistencia, sino también el comportamiento de flujo.

5.2.2 Efecto de la concentración de fibra sobre la tixotropía en el zumo de limón

En la Tabla 12 se encuentran los parámetros obtenidos con el ajuste de los datos experimentales a la ecuación definida por Figoni-Shoemaker. Observando en primer lugar los coeficientes de determinación, se ve como todos superan el 87%, lo que indica que el modelo resulta útil para describir la evolución del esfuerzo cortante con el tiempo.

Se pudo observar que para el zumo de limón a concentración de 0 a 8%, no se observó tixotropía y que para los porcentajes de fibra de 10 a 22% se observó tixotropía, y ésta fue en aumento a medida que se incrementó el contenido de fibra. Los resultados mostrados en la Tabla 9. demuestran que el esfuerzo cortante de equilibrio, σ_e (Pa), aumenta con el aumento de la concentración de fibra, lo que significa que a medida aumenta la cantidad de fibra, incrementará la viscosidad aparente final. Analizando una determinada concentración de fibra, se puede observar que el esfuerzo cortante de equilibrio σ_e (Pa) aumenta, a medida disminuye la temperatura.

Para las concentraciones de fibras estudiadas del zumo de limón se observa que el parámetro que representa una medida de la cantidad de estructura que se ha destruido durante el cizallamiento ($\sigma_0 - \sigma_e$) aumenta de forma progresiva a medida que aumenta el contenido de fibra. Para el contenido de fibra de 10%, la cantidad de estructura que se ha destruido durante el cizallamiento, expresada como ($\sigma_0 - \sigma_e$) es de 1,36 Pa a 60 °C y de 1,82 Pa a 5 °C. De igual modo, este parámetro aumenta con el porcentaje de fibra de 22% de 2,05 Pa a 60 °C y de 21,02 Pa a 5 °C, observándose también la influencia de la temperatura. Estos parámetros indican que la adición de fibra sobre la tixotropía tiene una incidencia importante y que tanto la concentración de fibra como la temperatura, van a influir en las características del flujo especialmente en las que contengan un mayor porcentaje de fibra.

Considerando los porcentajes de fibra se puede observar que los valores mayores de k se mostraron en las muestras con porcentajes de fibra menores y por otro lado los menores valores de k se observaron en las muestras con mayor porcentaje de fibra, lo que indica que la velocidad con que se destruye la estructura es mayor a menor porcentaje de fibra. También se observa que, para un determinado porcentaje de fibra, la constante de k

aumenta con el aumento de la temperatura, confirmando que para las muestras a temperaturas más elevadas es más fácil eliminar su comportamiento tixotrópico.

Tabla 9. Valores de los parámetros reológicos del Modelo Figoni-Shoemaker en función del porcentaje de fibra y temperatura a una velocidad de cizalla de 100 s⁻¹

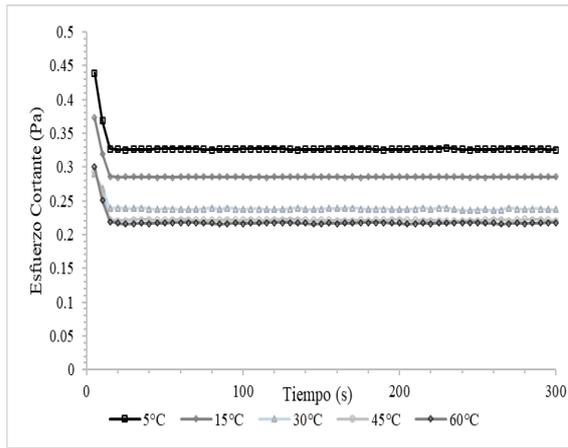
Cf (%)	T (°C)	k (s ⁻¹)	σ_0 (Pa)	σ_e (Pa)	$\sigma_0 - \sigma_e$ (Pa)	R ²
22	5	0,0108±0,0004	45,19±1,16	24,17±1,24	21,02	0,9956
22	15	0,0102±0,0065	15,35±0,98	12,32±1,16	3,03	0,9793
22	30	0,0077±0,0006	15,42±1,01	13,34±0,84	2,08	0,9522
22	45	0,0109±0,0009	10,42±0,42	8,19±0,32	2,23	0,9925
22	60	0,0108±0,0007	10,41±1,14	8,36±1,14	2,05	0,9755
20	5	0,0101±0,0005	24,65±0,26	14,86±0,04	9,79	0,9977
20	15	0,0092±0,0010	21,87±1,47	12,96±1,10	8,91	0,9814
20	30	0,0092±0,0009	13,45±0,89	9,43±0,36	4,02	0,9811
20	45	0,0109±0,0003	10,42±2,13	8,19±1,14	2,23	0,9945
20	60	0,0108±0,0017	10,41±1,88	9,36±1,03	1,05	0,9725
18	5	0,0113±0,0008	14,24±0,82	9,11±0,07	5,13	0,9984
18	15	0,0109±0,0010	15,19±1,14	9,82±0,09	5,37	0,9829
18	30	0,0092±0,0014	13,03±0,95	9,01±1,40	4,02	0,9902
18	45	0,0119±0,0016	6,82±1,11	5,75±0,44	1,07	0,9855
18	60	0,0228±0,0018	7,12±2,02	5,30±0,09	1,82	0,9591
16	5	0,0108±0,0017	11,52±0,78	6,84±0,01	4,65	0,9789
16	15	0,0091±0,0007	9,06±1,39	6,11±0,85	3,16	0,9816
16	30	0,0085±0,0006	6,68±1,54	4,14±0,32	2,54	0,9520
16	45	0,0104±0,0010	4,82±0,47	3,57±0,21	1,25	0,9829
16	60	0,2054±0,0020	4,82±0,32	3,53±0,04	1,29	0,9731
14	5	0,0618±0,0013	10,53±1,02	4,31±0,74	6,22	0,9599
14	15	0,0056±0,0007	3,66±0,68	2,45±0,41	1,21	0,9316
14	30	0,0075±0,0018	4,57±0,98	2,57±0,35	2,00	0,9696
14	45	0,2932±0,0174	4,44±1,14	2,02±0,14	2,42	0,9353
14	60	0,4374±0,0211	5,19±2,14	2,21±0,17	2,98	0,9968
12	5	0,0089±0,0005	4,86±2,15	3,01±0,06	1,85	0,9322
12	15	0,0075±0,0014	2,92±0,12	1,73±0,14	1,19	0,9213
12	30	0,0085±0,0009	2,76±0,09	1,51±0,07	1,25	0,9772
12	45	0,3922±0,0421	3,30±1,12	0,96±0,09	2,41	0,9872
12	60	0,1488±0,0006	2,74±1,13	1,21±1,14	1,53	0,9770
10	5	0,0115±0,0022	4,17±0,07	2,35±0,84	1,82	0,9814
10	15	0,1613±0,0045	2,77±0,14	1,67±0,66	1,11	0,8734
10	30	0,2847±0,0140	3,05±0,74	1,11±0,27	1,94	0,9487

10	45	0,3909±0,0053	4,39±0,07	1,23±0,01	3,16	0,9381
10	60	0,1652±0,0012	1,77±0,06	0,41±0,02	1,36	0,9412

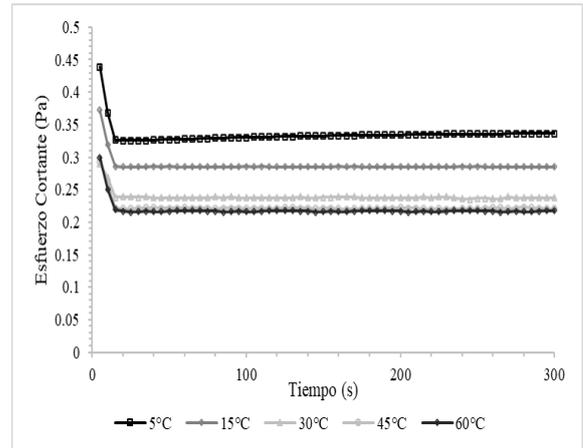
5.2.3 Efecto de la temperatura de fibra sobre la tixotropía en el zumo de limón

A medida aumenta la temperatura, la tixotropía se reduce (Ramos e Ibarz, 1998). Para el efecto de la temperatura en el zumo de limón a diferentes concentraciones, se pudo observar que al aumentar la temperatura el esfuerzo cortante de equilibrio decrece, lo cual indicará que habrá una menor viscosidad aparente a medida aumenta la temperatura. En la Figura 21, se ha representado la forma gráfica la variación del esfuerzo cortante con el tiempo para la velocidad de deformación de 100 s^{-1} , y se observa la influencia que ejerce la temperatura y la concentración de fibra en el carácter tixotrópico del zumo de limón. Adicionalmente, se observa que la degradación estructural de las muestras disminuye a medida incrementa la temperatura, siendo menor la disminución del esfuerzo cortante.

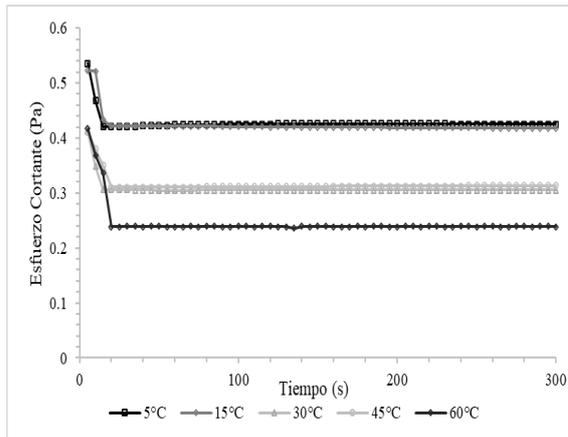
(a)



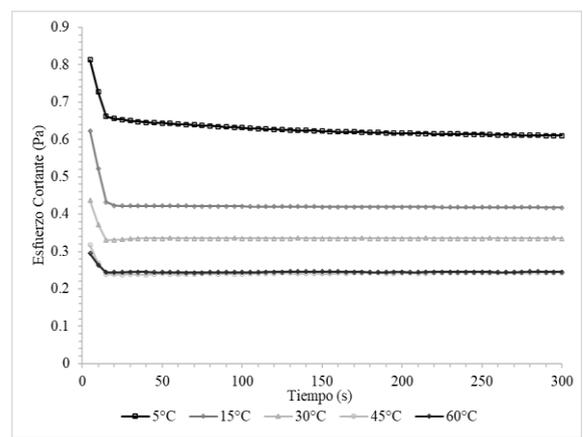
(b)



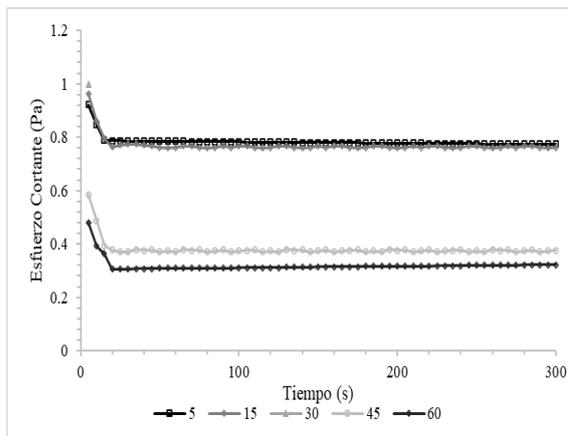
(c)



(d)



(e)



(a) disolución al 0%

(b) disolución al 2%

(c) disolución al 4%

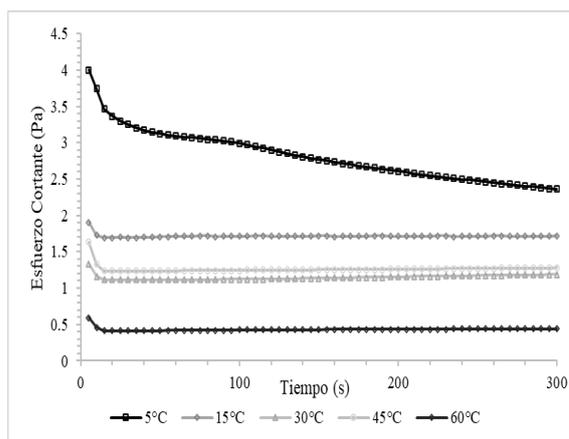
(d) disolución al 6%

(e) disolución al 8%

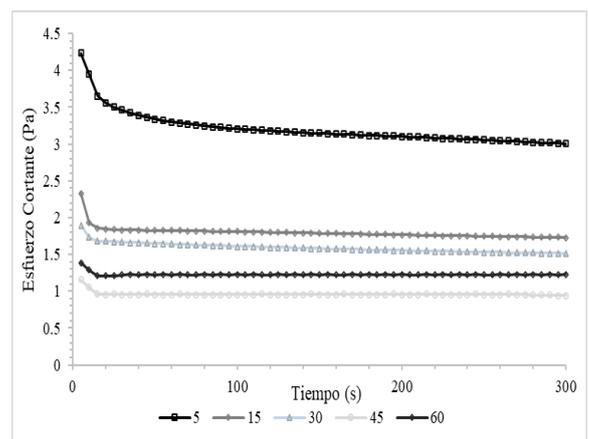
Figura 21. Variación del esfuerzo cortante con el tiempo para el zumo de limón de 0 a 8 % de fibra a diferentes temperaturas. Modelo Figoni Shoemaker.

En la Figura 22, se puede observar que a medida aumenta la temperatura se reduce la tixotropía, y esta aumenta a medida aumenta la concentración. También se puede observar como la degradación de la estructura de las muestras aumenta a medida disminuye la temperatura, siendo 5 °C en todos los casos para cada una de las concentraciones, la temperatura que presenta el mayor desmoronamiento. Asimismo, el esfuerzo cortante decrece a medida que la temperatura aumenta.

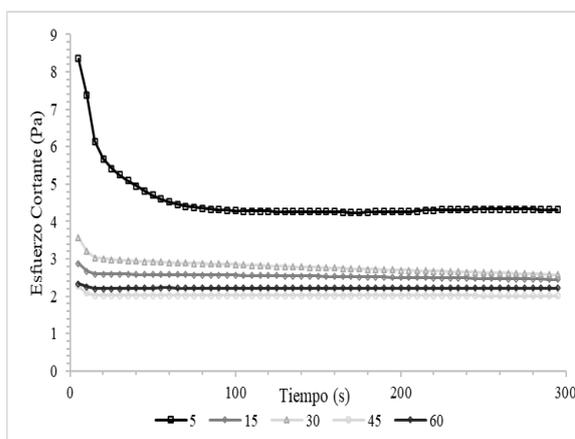
(a)



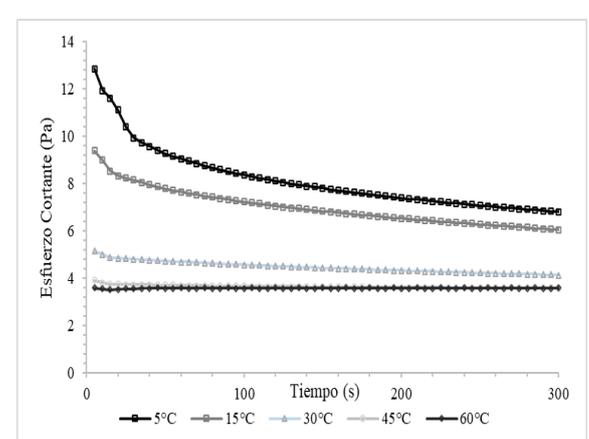
(b)



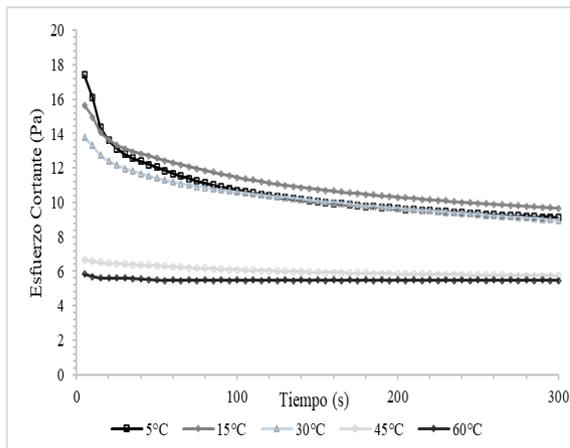
(c)



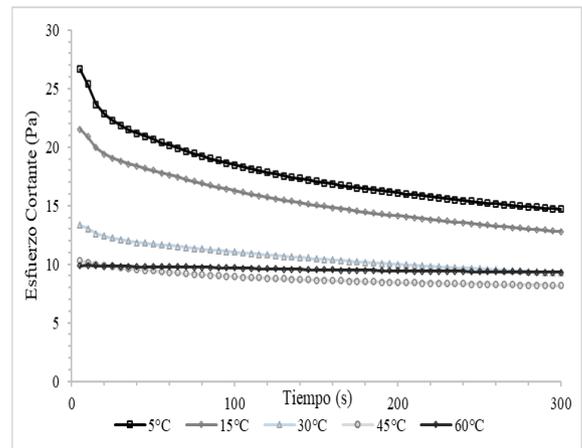
(d)



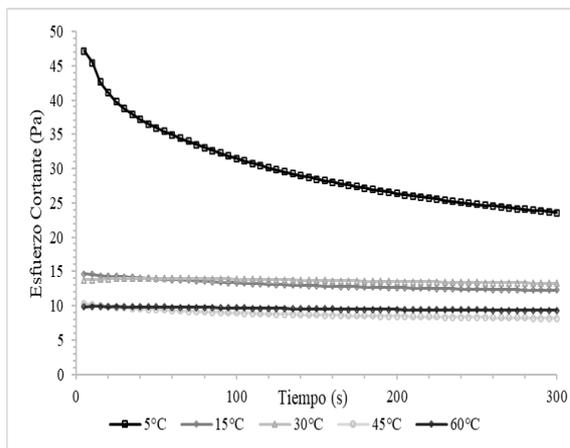
(e)



(f)



(g)



(a) disolución al 10%

(b) disolución al 12%

(c) disolución al 14%

(d) disolución al 16%

(e) disolución al 18%

(f) disolución al 20%

Figura 22. Variación del esfuerzo cortante con el tiempo para el zumo de limón de 10 a 22 % de fibra a diferentes temperaturas. Modelo Figoni Shoemaker.

5.2.4 Comportamiento al flujo zumo de limón con fibra

En la Figura 23 a 34, se pueden observar los diferentes reogramas del zumo de limón a diferentes concentraciones de fibra a temperaturas de entre 5 a 60°C y la línea correspondiente al modelo Herschel-Bulkley ajustado en cada caso, cuyos parámetros aparecen en la Tabla 10.

Estos reogramas corresponden a una línea recta si el fluido es newtoniano, una curva característica de un fluido pseudo-plástico (si el umbral de fluencia es nulo) o bien de Herschel-Bulkley (si es diferente de cero), tal como es usual en los zumos de fruta que contienen pulpa y pectinas (Falguera e Ibarz, 2010).

En general, se observa que en los reogramas se manifiesta un aumento de la consistencia de la muestra a medida que aumenta el contenido de fibra y la temperatura disminuye. Analizando la representación gráfica de los resultados obtenidos del zumo de limón entre la variación del esfuerzo cortante (σ) y la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$), a las diferentes concentraciones y temperaturas estudiadas, se observa una curva de comportamiento de fluido newtoniano para los reogramas de 0 a 12% de contenido de fibra a todas las temperaturas. También se observa que, para las distintas temperaturas ensayadas, los valores que alcanza el esfuerzo cortante se hacen mayores a medida que aumenta la velocidad de deformación. Haciendo una comparación entre cada uno de los reogramas de 0 a 12% de contenido en fibra, se puede apreciar que, para la misma temperatura y velocidad de deformación, el esfuerzo cortante aumenta al aumentar la concentración de fibra.

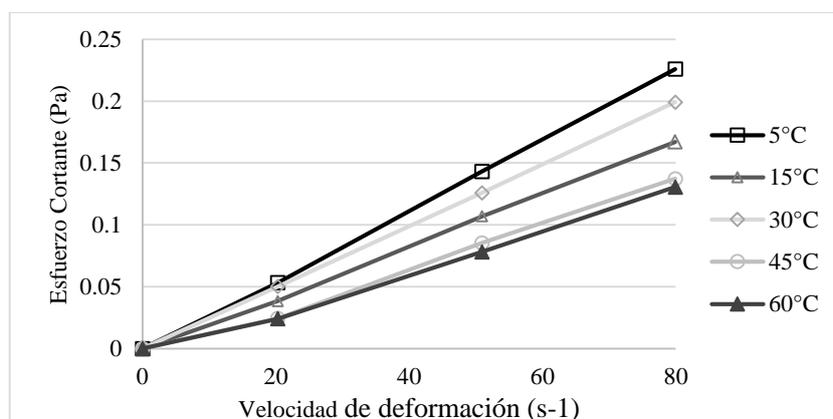


Figura 23. Reograma para zumo de limón a concentración de 0% de fibra a todas las temperaturas.

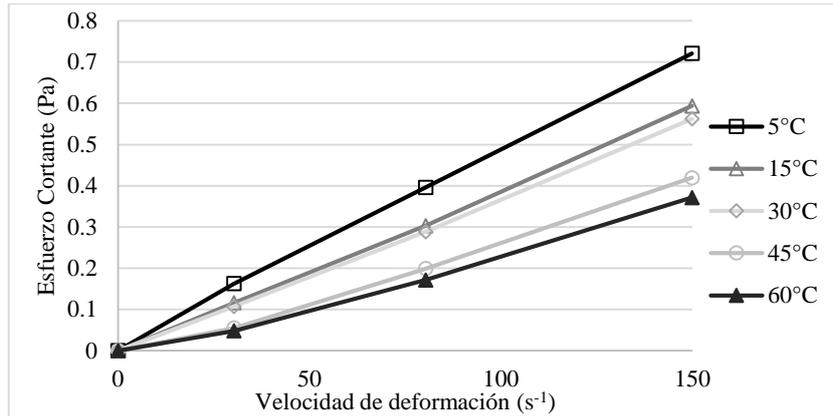


Figura 24. Reograma para zumo de limón a concentración de 2% de fibra a todas las temperaturas.

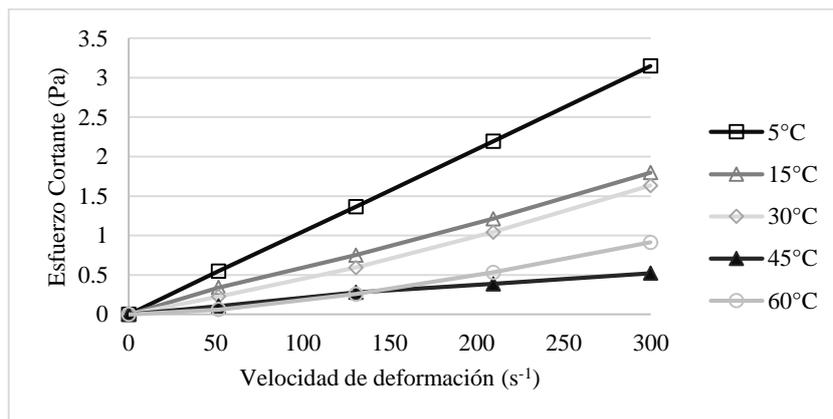


Figura 25. Reograma para zumo de limón a concentración de 4% de fibra a todas las temperaturas.

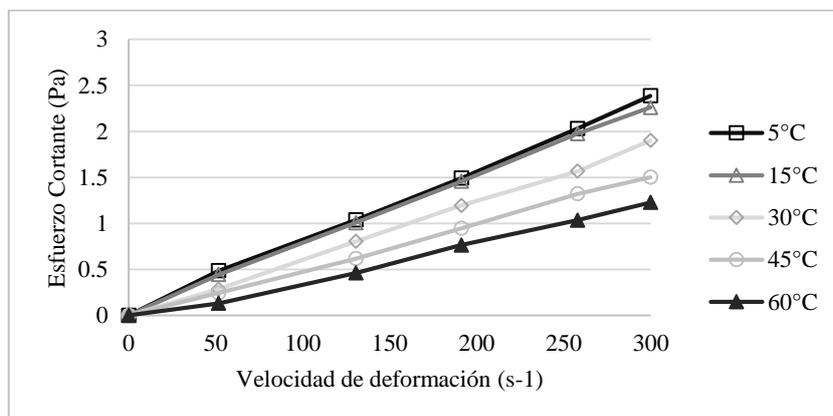


Figura 26. Reograma para zumo de limón a concentración de 6% de fibra a todas las temperaturas.

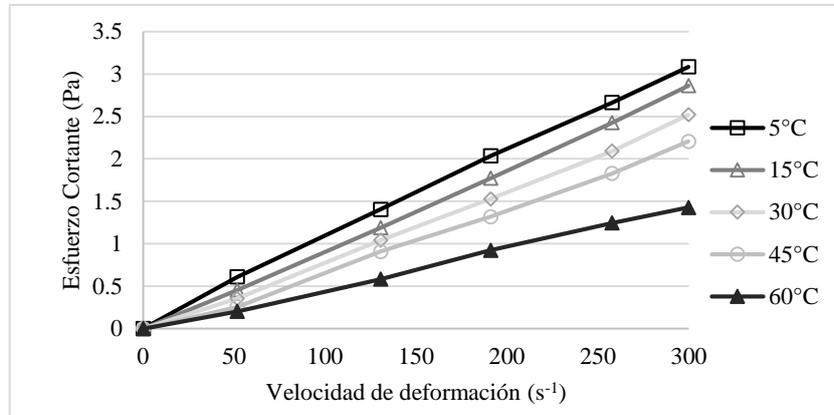


Figura 27. Reograma para zumo de limón a concentración de 8% de fibra a todas las temperaturas.

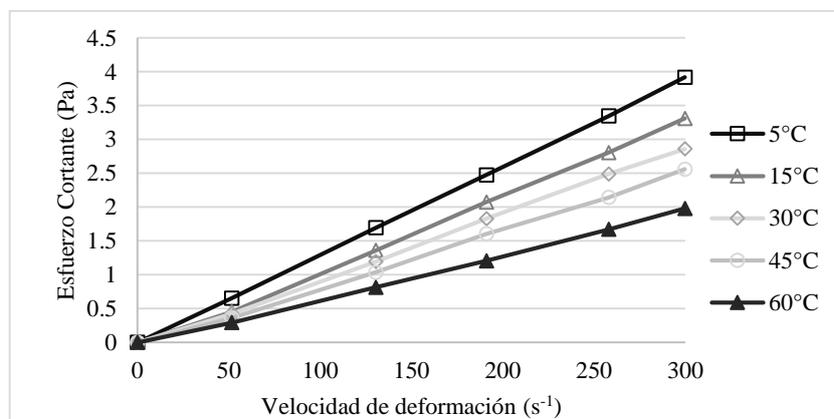


Figura 28. Reograma para zumo de limón a concentración de 10% de fibra a todas las temperaturas.

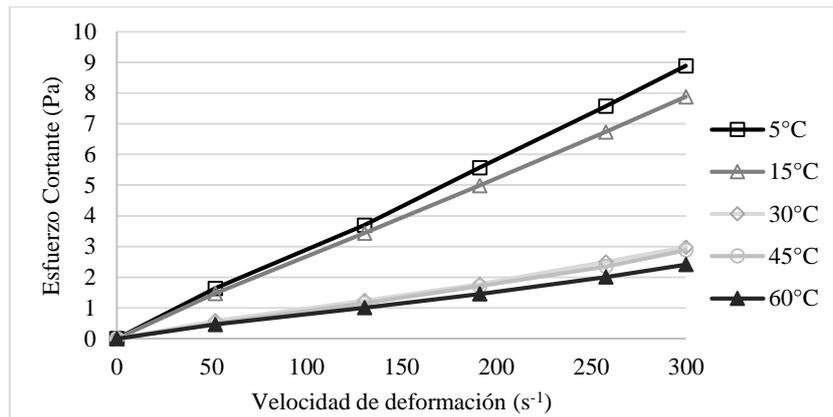


Figura 29. Reograma para zumo de limón a concentración de 12% de fibra a todas las temperaturas.

Analizando las Figuras 30, 31 y 32. Se puede observar que la evolución del esfuerzo cortante (σ) con la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$) obtenida experimentalmente para el zumo de limón a diferentes concentraciones y para el intervalo de temperatura de 5 a 60 °C, presenta curvas de un fluido pseudo-plástico, donde el esfuerzo cortante aumenta con el aumento de la velocidad de deformación según una función potencial.

En estas figuras es posible observar que el índice de consistencia decrece a medida aumenta la temperatura, lo que se traduce, en que a medida aumenta la temperatura se observará un decrecimiento en la pseudo-plasticidad de la muestra. Por otro lado, este índice aumenta cuando se aumenta el contenido de fibra, aumentando su pseudo-plasticidad a medida aumenta dicha concentración.

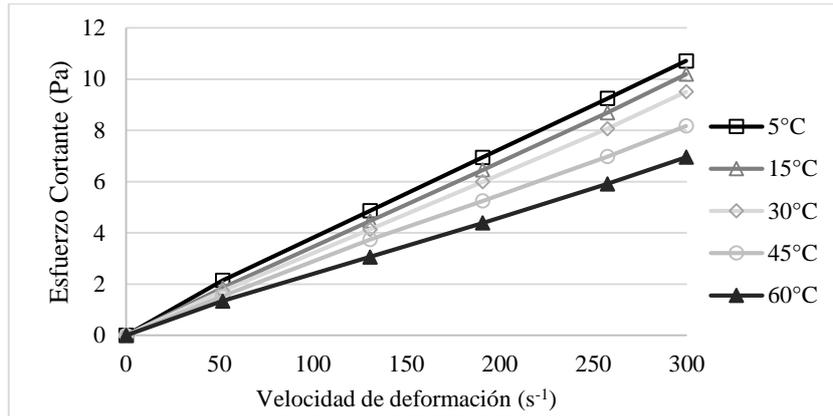


Figura 30. Reograma para zumo de limón a concentración de 14% de fibra a todas las temperaturas.

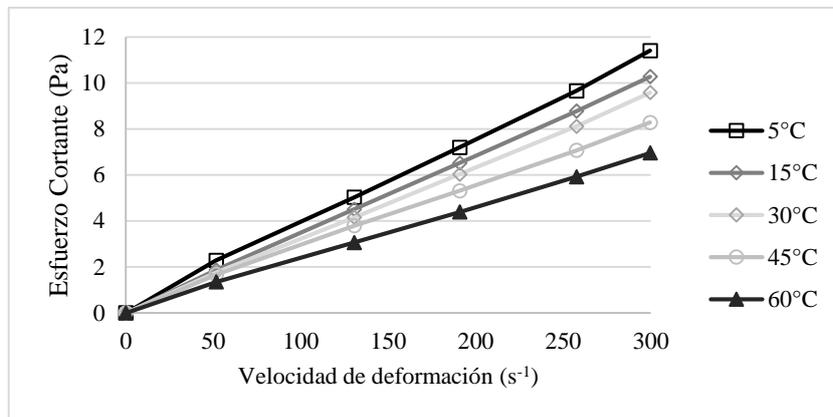


Figura 31. Reograma para zumo de limón a concentración de 16% de fibra a todas las temperaturas.

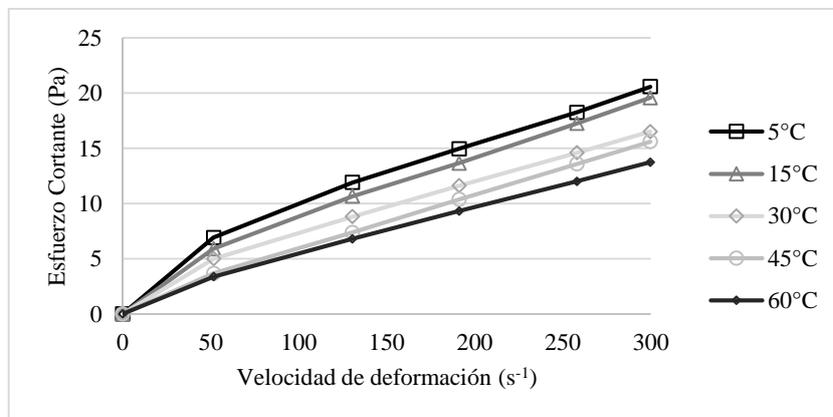


Figura 32. Reograma para zumo de limón a concentración de 18% de fibra a todas las temperaturas.

Por otro lado, la muestra de zumo de limón con 20 y 22% Cf, como se observa en las Figuras 33 y 34, se comportan como un fluido Herschel-Burkely, ya que presentan un esfuerzo umbral. Por otra parte, a temperatura más baja, el esfuerzo cortante aumenta más rápidamente con el incremento del gradiente de velocidad.

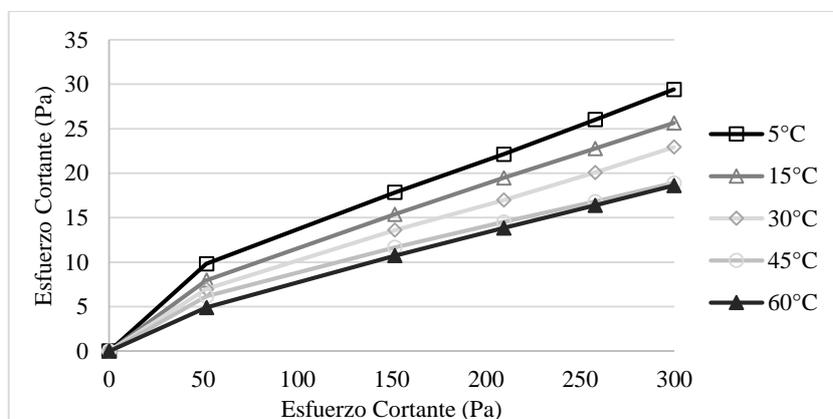


Figura 33. Reograma para zumo de limón a concentración de 20% de fibra a todas las temperaturas.

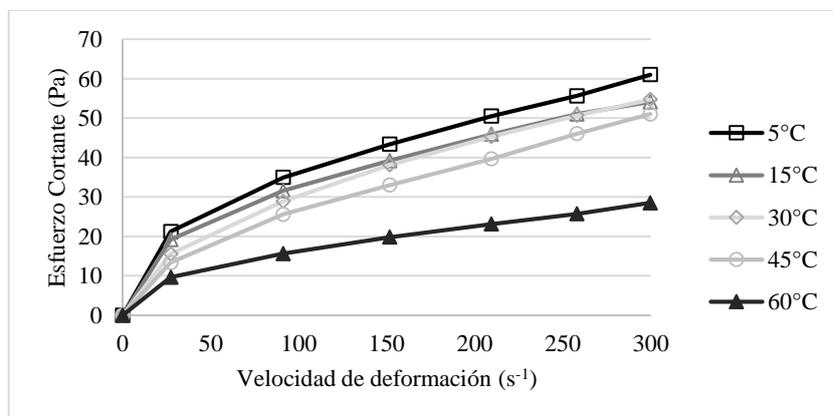


Figura 34. Reograma para zumo de limón a concentración de 22% de fibra a todas las temperaturas.

Los resultados experimentales de la evolución del esfuerzo cortante con la velocidad de deformación para el zumo de limón se han ajustado, por el modelo Herschel-Bulkley obteniéndose los valores del índice de consistencia k y del índice de comportamiento al flujo n , para las distintas temperaturas ensayadas. En la Tabla 10, tanto los ajustes como los estimados de los parámetros obtenidos, resultaron significativos en un nivel de probabilidad del 95%. Se observa que a partir de los datos del ajuste de la Tabla 10, el índice de consistencia del zumo de limón ha disminuido al aumentar la temperatura. Si se toma como referencia la muestra de 22%, se puede observar que los valores varían de un máximo de 4,57 Pa.sⁿ para la temperatura de 5 °C hasta 1,61 Pa.sⁿ para 60 °C. También se puede observar que el índice de comportamiento al flujo de las muestras de zumo de limón que presentaron un comportamiento pseudoplástico, disminuyen al aumentar la concentración de fibra. El índice de comportamiento al flujo también es dependiente de la temperatura, ya que los valores de n disminuyen a medida que decrece la temperatura. Los valores en las muestras a partir del 14% de fibra confirman un grado de pseudoplasticidad del zumo de limón. En el trabajo de Augusto *et al.* (2011), se puede observar un comportamiento similar en un zumo de melocotón con fibra añadida a un porcentaje de 12% a 20 °C donde el valor del índice de comportamiento al flujo fue de 0.49.

Tabla 10. Valores para los parámetros del modelo Herschel-Bulkley ($0.1 \text{ s}^{-1} < \dot{\gamma} < 300 \text{ s}^{-1}$, con promedio de tres replicas \pm desviación standard).

Fibra (%)	Temperatura (°C)	σ_0 (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n	R ²	Comportamiento Reológico
0	60	0,000±0,000	0,0003±0,00020	1,000±0,000	0,9933	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,0009±0,00018	1,000±0,000	0,9979	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,0023±0,00012	1,000±0,000	0,9914	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,0022±0,00018	1,000±0,000	0,9993	Newtoniano

	5	0,000±0,000	0,0024±0,00011	1,000±0,000	0,9893	Newtoniano
2	60	0,000±0,000	0,0009±0,00005	1,000±0,000	0,9971	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,0020±0,00006	1,000±0,000	0,9987	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,0026±0,00016	1,000±0,000	0,9959	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,0030±0,00006	1,000±0,000	0,9992	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,0056±0,00024	1,000±0,000	0,9991	Newtoniano
4	60	0,000±0,000	0,0019±0,00022	1,000±0,000	0,9992	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,0026±0,00014	1,000±0,000	0,9981	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,0030±0,00070	1,000±0,000	0,9984	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,0046±0,00075	1,000±0,000	0,9982	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,0073±0,00021	1,000±0,000	0,9994	Newtoniano
6	60	0,000±0,000	0,0024±0,00080	1,000±0,000	0,9997	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,0030±0,00012	1,000±0,000	0,9995	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,0030±0,00040	1,000±0,000	0,9996	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,0059±0,00025	1,000±0,000	0,9996	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,0073±0,00019	1,000±0,000	0,9971	Newtoniano
8	60	0,000±0,000	0,0035±0,00071	1,000±0,000	0,9995	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,0039±0,00041	1,000±0,000	0,9978	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,0053±0,00043	1,000±0,000	0,9968	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,0052±0,00019	1,000±0,000	0,9903	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,0069±0,00010	1,000±0,000	0,9967	Newtoniano
10	60	0,000±0,000	0,0041±0,00074	1,000±0,000	0,9992	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,0055±0,00176	1,000±0,000	0,9954	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,0073±0,00107	1,000±0,000	0,9952	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,0074±0,00284	1,000±0,000	0,9996	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,0121±0,00374	1,000±0,000	0,9999	Newtoniano
12	60	0,000±0,000	0,0061±0,00131	1,000±0,000	0,9958	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,0055±0,00041	1,000±0,000	0,9974	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,0080±0,00164	1,000±0,000	0,9992	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,0145±0,01403	1,000±0,000	0,9996	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,0152±0,00912	1,000±0,000	0,9995	Newtoniano
14	60	0,000±0,000	0,0142±0,00381	1,000±0,000	0,9998	Newtoniano
	45	0,000±0,005	0,0161±0,00519	1,000±0,000	0,9994	Newtoniano
	30	0,048±0,009	0,0243±0,00349	0,991±0,017	0,9997	Ley Potencia
	15	0,079±0,012	0,0274±0,00956	0,981±0,007	0,9988	Ley Potencia
	5	0,094±0,032	0,0350±0,00929	0,951±0,018	0,9998	Ley Potencia
16	60	0,000±0,000	0,0251±0,00140	0,989±0,073	0,9997	Ley Potencia
	45	0,022±0,004	0,0342±0,00232	0,996±0,047	0,9997	Ley Potencia
	30	0,045±0,001	0,0362±0,00114	0,991±0,034	0,9996	Ley Potencia
	15	0,056±0,001	0,0412±0,00123	0,964±0,052	0,9989	Ley Potencia
	5	0,148±0,019	0,0437±0,00247	0,971±0,047	0,9990	Ley Potencia
18	60	0,174±0,032	0,1094±0,00125	0,841±0,033	0,9965	Ley Potencia
	45	0,205±0,044	0,1098±0,03211	0,820±0,014	0,9986	Ley Potencia
	30	0,211±0,028	0,2703±0,00987	0,828±0,012	0,9988	Ley Potencia
	15	0,320±0,063	0,3369±0,00432	0,708±0,021	0,9986	Ley Potencia
	5	0,425±0,021	0,4712±0,00110	0,653±0,011	0,9961	Ley Potencia
20	60	0,391±0,021	0,1833±0,01204	0,809±0,010	0,9991	Ley Potencia
	45	0,394±0,124	0,2971±0,07243	0,711±0,041	0,9985	Herschel-Bulkley
	30	0,932±0,351	0,3096±0,10102	0,713±0,023	0,9958	Herschel-Bulkley
	15	1,001±0,110	0,3628±0,13202	0,723±0,014	0,9966	Herschel-Bulkley
	5	1,176±0,047	0,5463±0,13257	0,687±0,021	0,9995	Herschel-Bulkley
22	60	0,952±0,122	1,6083±0,22432	0,581±0,121	0,9996	Herschel-Bulkley
	45	1,008±0,210	1,7982±0,11631	0,538±0,102	0,9996	Herschel-Bulkley
	30	1,013±0,257	2,5319±0,07422	0,534±0,222	0,9997	Herschel-Bulkley

15	1,012±0,135	4,0613±0,14750	0,450±0,174	0,9986	Herschel-Bulkley
5	1,315±0,241	4,5757±0,24710	0,445±0,016	0,9973	Herschel-Bulkley

5.2.5 Efecto de la temperatura sobre el comportamiento al flujo

Para cuantificar el efecto que la temperatura ejerce sobre la consistencia de cada fluido, las estimaciones de viscosidad para los modelos newtonianos y el índice de consistencia para los modelos no newtonianos se ajustaron a una ecuación de tipo Arrhenius (Ecuación 7), obteniendo un par de estimaciones para $\ln k_0$ y E_a para cada contenido de fibra. La Tabla 11 muestra estos parámetros ajustados de Arrhenius obtenidos de los modelos Newton, Ley de la Potencia y Herschel-Bulkley previamente ajustados para 0-14%, 16-18% y 20-22% de contenido de fibra, respectivamente. Como todos los coeficientes de determinación fueron siempre superiores a 0,85 y todos los valores de p claramente inferiores a 0,05, se concluyó que la ecuación de Arrhenius (Ecuación 8) describe adecuadamente el efecto de la temperatura en la consistencia del zumo, independientemente del modelo reológico.

Tabla 11. Parámetros de la ecuación Arrhenius

Fibra (%)	E_a (kJ/mol)	$\ln k_0$	R^2	k_0 (mPa·s ⁿ)
0	15,88	-5,959	0,8075	2,582E-03
2	16,83	-5,764	0,9131	3,137E-03
4	16,06	-5,169	0,9295	5,694E-03
6	15,97	-4,979	0,9064	6,881E-03
8	9,57	-2,227	0,8018	1,079E-01
10	13,86	-3,375	0,9165	3,422E-02
12	17,05	-4,611	0,9579	9,942E-03
14	12,79	-1,984	0,9687	1,374E-01
16	12,72	-1,441	0,9333	2,369E-01
18	15,30	-0,462	0,9737	6,300E-01
20	17,33	-1,075	0,8789	3,413E-01
22	15,34	1,822	0,9689	6,172E+00

En la Tabla 11, se observa que el parámetro k_0 presenta valores bajos y aumenta con el aumento de la concentración. Se observa que la energía de activación del flujo presenta el menor valor (9,57 kJ/mol) a un porcentaje de fibra de 8%, por otro lado, se observa que el valor más alto de E_a (17,33 kJ/mol) fue a 20% de fibra. Se puede observar que la energía de activación no varió considerablemente a medida que aumentó el contenido de fibra. Estos resultados indican que la temperatura ejerce una influencia pequeña sobre el comportamiento reológico para este caso. Saravacos (1970), estableció que la energía de activación puede decrecer significativamente cuando hay partículas en suspensión y que en los fluidos pseudo-plásticos el efecto de la temperatura será menor. Aunque se ha reconocido ampliamente que la viscosidad se ve afectada por el peso molecular de los azúcares contenidos en la muestra, el efecto de las diferentes composiciones de monosacáridos en jugos de frutas y verduras no se ha establecido (Diamante y Umemoto, 2015) y este es un campo en el que posiblemente pueda expandirse el estudio reológico. Valores similares han sido encontrados para jugos, pures y néctares todos en intervalos de temperatura distintos. De este modo, para un jugo de endrino (Ibarz *et al.*, 1996), un néctar de membrillo (Bozkurt e Icier, 2009) y un puré de guayaba (Sanchez *et al.*, 2009), se encontraron valores de energía de activación al flujo de 10 kJ/mol, 9,88 kJ/mol y 16,73 kJ/mol, respectivamente.

5.2.6 Efecto de la concentración sobre el comportamiento al flujo

El efecto del contenido en fibra sobre el comportamiento reológico del zumo de limón con fibra añadida puede describirse por un modelo potencial (Ecuación 10) y por un modelo exponencial (Ecuación 9). Para obtener los valores estimados de los modelos anteriores se han ajustado los datos experimentales al tipo de ecuaciones citadas. El mejor ajuste se ha obtenido con el modelo exponencial, ya que presenta valores de coeficientes

de determinación más elevados. De este modo, para este estudio únicamente se presentan los ajustes a este modelo.

Tabla 12. Influencia del contenido de fibra en la consistencia (índice de consistencia o viscosidad) a cada temperatura. $k = a_1 \exp(b_1 C)$

Temperatura (°C)	a_1 (mPa*s ⁿ)	b_1 (% ⁻¹)	R^2
5	1,421	0,2853	0,8464
15	0,882	0,2832	0,8865
30	0,659	0,2825	0,8839
45	0,676	0,2664	0,8583
60	0,434	0,2541	0,9024

En la Tabla 12, se observa que los parámetros del modelo exponencial a_1 y b_1 presentan la misma tendencia, esto es, que disminuyen con el aumento de la temperatura, es decir, que el efecto de la concentración, sobre los valores del esfuerzo de fluencia que presenta el zumo de limón, es más importante cuando los valores de las temperaturas son más bajos.

5.2.7 Compensación Cinética

Tomando en cuenta los parámetros de la ecuación de Arrhenius de la Tabla 11. Se elaboró la Figura 35, en donde se muestra la dependencia del $\ln k_0$ y la energía de activación (E_a) cuando el contenido de fibra varía, en este caso se muestran dos líneas diferentes, una para los parámetros obtenidos para los contenidos de fibra de 2 a 16% y otro obtenido para los contenidos de fibra de 18 a 22%. Concluyendo, la existencia de una compensación cinética en la consistencia de jugo de limón para diferentes contenidos de fibra. Dado las dos líneas claramente diferentes, se concluyó un mecanismo de flujo de fluido diferente para cada línea, es decir una línea para las concentraciones menores de

16% contenido de fibra y otro intervalo para los contenidos mayores de 18% contenido de fibra.

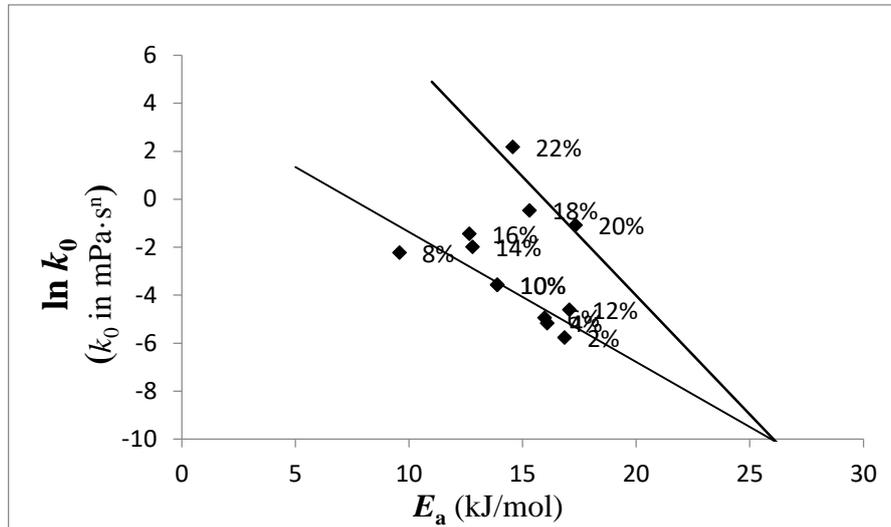


Figura 35. Compensación cinética zumo de limón con fibra añadida

La existencia de las líneas implica que la variable ambiental, en este caso el contenido de fibra no cambia el mecanismo del flujo para todo el intervalo de valores del contenido de fibra para el cual la relación es una línea. Es decir, cuando el contenido de fibra aumenta mayor a un valor de 16%, no solo el modelo cambia de pseudo-plástico a Herschel-Bulkley, sino que también cambió el mecanismo del flujo.

Los datos en la Tabla 11. Se ajustaron a la ecuación 16, encontrando las dos líneas que se muestran en la Figura 35. La Tabla 12 muestra estimaciones y los intervalos de confianza para ambos parámetros.

Tabla 13. Parámetros de la compensación cinética

Contenido de fibra (g/100 g)		2%-16%	18%-22%
T _{iso} (°C)	Valor	-51,0	-151,6
	Intervalo de confianza	-174,8 a 72,9	-229,5 a -73,6
ln(k _{T_{iso}})	Valor	4,04	15,79
	Intervalo de confianza	2,66 a 5,07	5,92 a 25,67
R ²		0,756	0,694

Las Figuras 36 y 37 muestran el hecho de que, según la teoría de compensación el valor de coeficiente de consistencia sería la misma que la temperatura de iso-consistencia para cada modelo. Estas figuras muestran los valores extrapolados en función de la temperatura, considerando que el comportamiento sería el mismo que el encontrado para el rango de temperaturas estudiadas. En la Figura 36, se observa como el logaritmo neperiano de la viscosidad expresada en mPa·s se aproxima al mismo valor 4,04 a la misma temperatura de -51,0 °C para cada zumo de limón con contenido de fibra hasta 16%. La Figura 37 muestra como el logaritmo neperiano del índice de consistencia expresado en mPa·sⁿ se aproxima al mismo valor de 15,79 a la misma temperatura -151,6 °C para los zumos de limón con contenido de 18 a 22%.

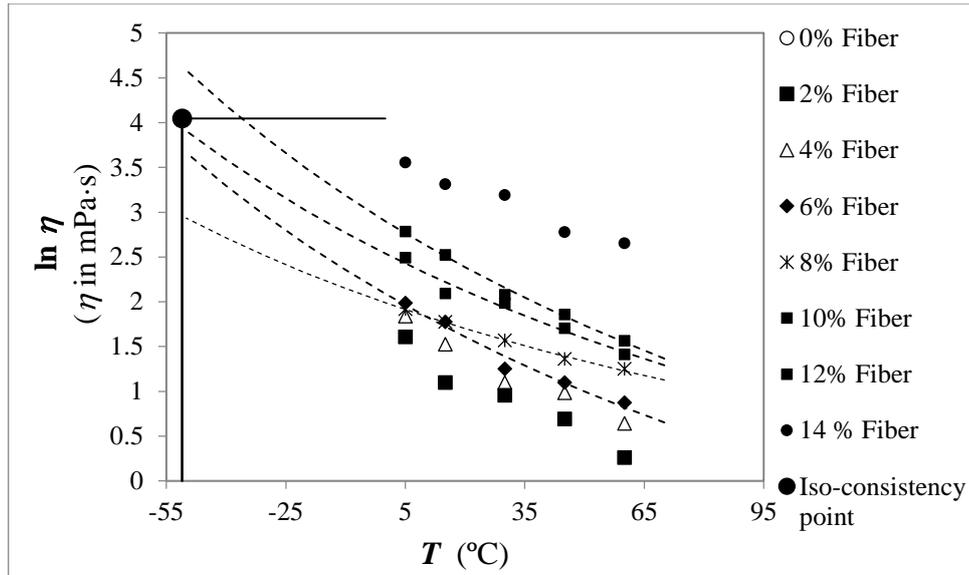


Figura 36. Tendencia de la viscosidad al punto iso-consistencia para los contenidos de fibra de 2% a 16%

Estas temperaturas a las cuales los valores de la viscosidad son los mismos independientemente del contenido de fibra se denomina temperatura de iso-consistencia. Ciertamente, la temperatura de iso-consistencia es solo un concepto y en algunos casos no es posible comprobarlos experimentalmente, en este caso en particular, las temperaturas de -51,0 y -151,6 °C encontrados, representarían zumos congelados y estos no fluirían.

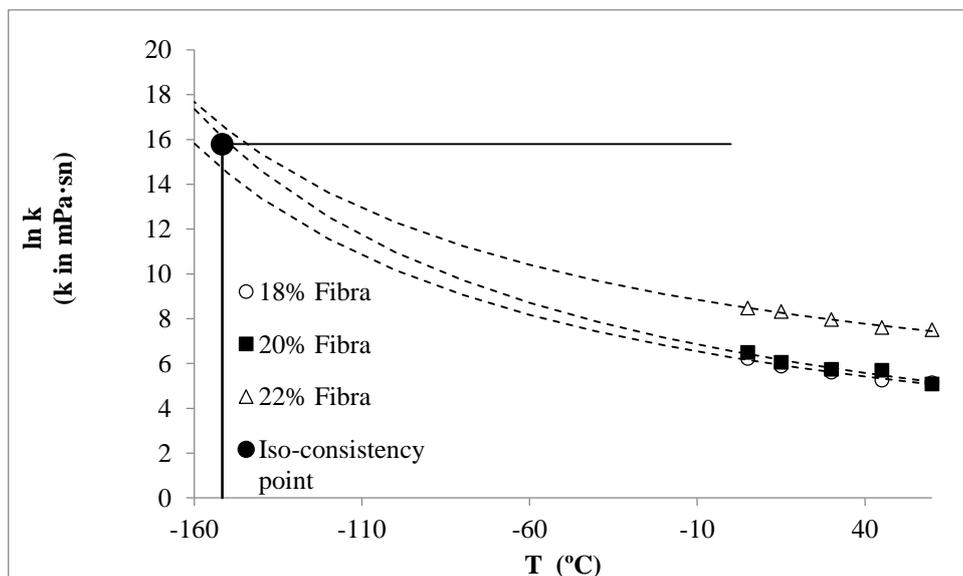


Figura 37. Tendencia de la viscosidad al punto iso-consistencia para los contenidos de fibra de 18% a 22%

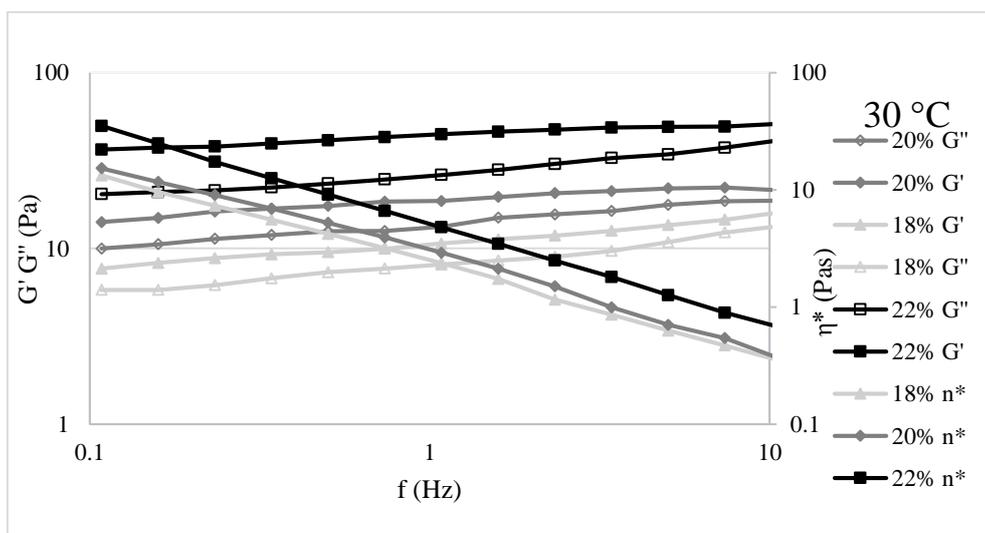
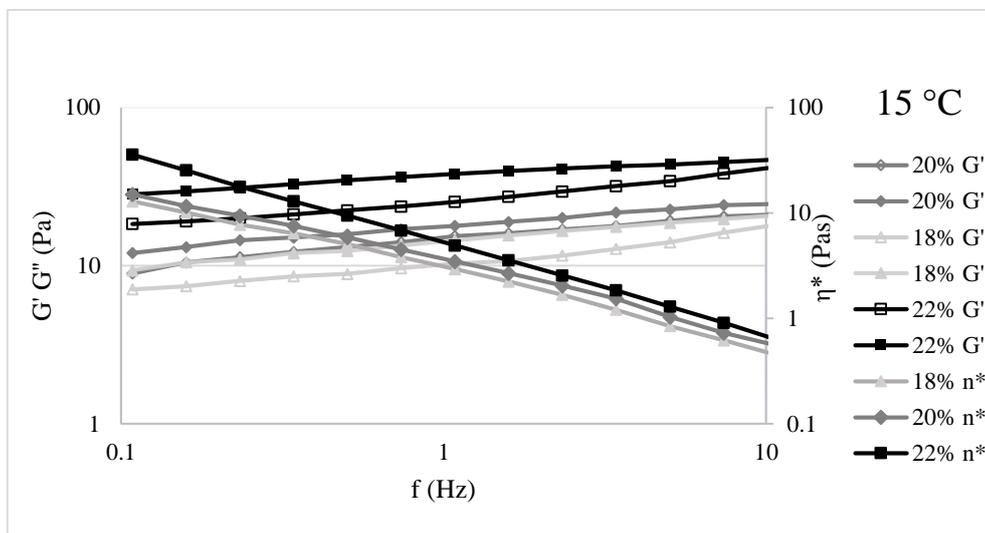
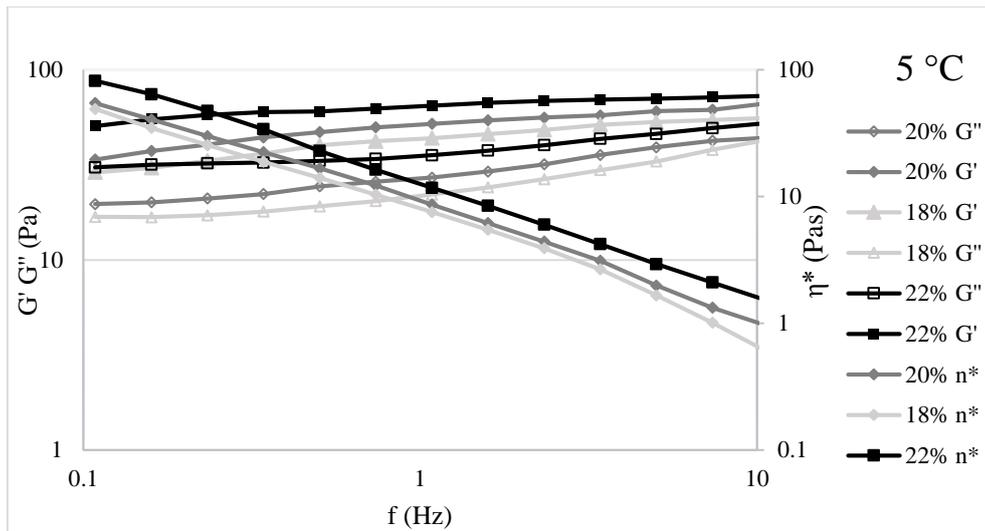
5.2.8 Caracterización de la viscoelasticidad del zumo de limón con fibra añadida

Los resultados experimentales de los ensayos dinámicos se expresan en términos de módulo de almacenamiento (G') y módulo de pérdidas (G'') (Ramos e Ibarz, 2006). Para poder cumplir estos experimentos correctamente hay que asegurarse de que se trabaja en la región de viscoelasticidad lineal ya que, tal y como se vio en el apartado de Material y Métodos, de esta manera se puede establecer una relación directa entre los resultados obtenidos y la estructura de la muestra (Ma y Barbosa-Cánovas, 1995). Los resultados de los ensayos reológicos experimentales oscilatorios expresados como G' y G'' se interpretan de la siguiente forma: Si G' es mayor que G'' , el material alimentario exhibe un comportamiento de un semisólido, es decir que tendrá características más viscosas. Por otro lado, si G'' es mayor que G' , el material se comporta como un semilíquido. Los módulos de almacenamiento (G'), los módulos de pérdida (G'') y la viscosidad compleja (n^*) se muestran en la Figura 35, en función de la frecuencia para todos los estudios de temperatura con 18%, 20% y 22% de fibra. Tanto el módulo de almacenamiento como el de pérdida son dependientes de la frecuencia a la que se lleva a cabo el experimento, creciendo a medida que éste aumenta.

En los experimentos para los valores de 5 a 60 °C, el valor de G' fue mayor que los valores de G'' en la frecuencia empleada, describiendo un comportamiento débil del gel, es decir un comportamiento con una tendencia semisólida. Este comportamiento ha sido reportado por otros autores en productos con características de consistencia similares; Tomate, almidón de maíz y zumo de durazno con fibra agregada, purés de zanahorias espesados con hidrocoloides, en zumo de manzana y tomate espesados a nivel de néctar y

pudin. (Rao y Cooley, 1992; Hirashima *et al.*, 2005, Ahmed y Ramaswamy, 2006 y Augusto *et al.*, 2011; y Moret-Tatay *et al.*, 2015)

Las magnitudes del módulo de almacenamiento aumentan con el incremento del contenido de fibra en el zumo de limón, lo que indica una tendencia a un comportamiento más predominante de un alimento semisólido a medida se aumenta el porcentaje de fibra (22>20>18). La Figura 35, también se observan las magnitudes absolutas de las viscosidades complejas η^* para las diferentes concentraciones en sólidos solubles del zumo de limón en el intervalo de las temperaturas, en función de la frecuencia. Se puede observar que la viscosidad compleja aumenta a medida que aumenta la concentración de fibra para los rangos de frecuencia estudiadas, esto significa que, a una mayor concentración de fibra, la estructura del fluido será más sólida.



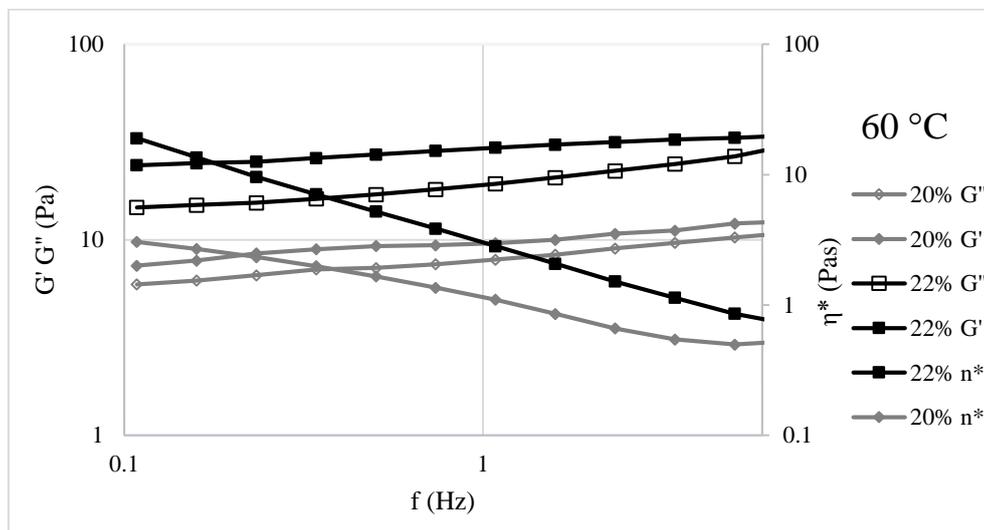
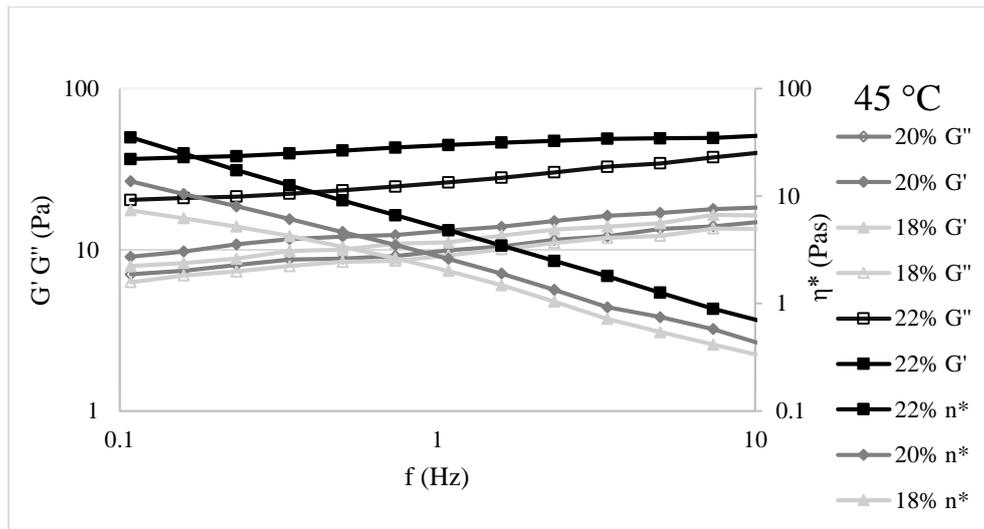


Figura 38. G' G'' y viscosidad compleja obtenida del barrido de frecuencia (0,01 a 10 Hz) para un esfuerzo cortante de 1 Pa. 22%, 20%, y 18% contenido de fibra a 5 °C, 15 °C, 30 °C, 45 °C y 60 °C.

Los parámetros de k' , n' , k'' , n'' , son los parámetros de regresión relacionados con G' , G'' y ω . Las regresiones de la ecuación para las tres concentraciones de fibra a diferentes temperaturas se muestran en la Tabla 13. Las muestras de 18%, 20% y 22% se ajustaron a $R^2 > 0,88$. Este coeficiente de regresión mostró que la muestra de zumo de limón con un 22% de fibra agregada en los rangos de temperatura de 5 a 60 °C exhibió un

comportamiento más sólido con una mayor magnitud de k' (51,62-13,37 Pa·sⁿ) que k'' (20,87-7,79 Pa·sⁿ). Se observó el mismo comportamiento para la muestra de zumo de limón con 20% y 18% de fibra agregada que exhibía un valor de k' (41,72-6,95 Pa·sⁿ) y (37,78-7,32 Pa·sⁿ) mayor que k'' (19,97-6,78 Pa·sⁿ) y (18,89-6,15 Pa·sⁿ) respectivamente, por otro lado, a la temperatura de 60 °C se da la situación contraria siendo el valor de k'' mayor que el valor de k' . Para los valores de n' y n'' , la muestra de zumo de limón con 22% de fibra mostró un valor en el intervalo de 0,21-0,12 y 0,22-0,16 respectivamente. Para la muestra de 20% de fibra los valores de n' y n'' son de 0,16-0,12 y 0,13-0,13 respectivamente. Por último, para la muestra de 18% de fibra los valores de n' y n'' son de 0,16-0,15 y 0,18-0,16 respectivamente. Estos parámetros indican que la temperatura representa una variable importante para el comportamiento viscoso del zumo de limón.

Un comportamiento similar de los parámetros k' , n' , k'' , n'' en términos de influencia de la temperatura se observa en un estudio de comportamiento viscoelástico dinámico de purés vegetales infantiles por Canet *et al.*, (2013).

Tabla 14. Parámetros de la ley de potencia para la correlación entre los módulos de almacenamiento y pérdida (G' y G''), en función de la frecuencia oscilatoria (ω) (1 pa, media de tres repeticiones \pm desviación estándar)

18% fibra				
T (°C)	G'		G''	
	k' (Pa·s ⁿ)	n'	k'' (Pa·s ⁿ)	n''
5	37,78±5,37	0,16 ± 0,00	18,89±1,58	0,18±0,00
15	11,43±1,04	0,16 ± 0,01	8,65±1,38	0,17±0,00
30	10,15±1,41	0,14 ± 0,00	7,20±1,35	0,16±0,05
45	7,32±0,51	0,15 ± 0,01	6,15±0,25	0,16±0,01
60	-	-	-	-

20% fibra				
T (°C)	G'		G''	
	k' (Pa·s ^{n'})	n'	k'' (Pa·s ^{n''})	n''
5	41,72±0,501	0,16±0,01	20,65±0,12	0,17 ± 0,06
15	13,28±0,542	0,16±0,00	9,16± 1,29	0,16 ± 0,00
30	11,54±0,514	0,12±0,01	8,63±1,18	0,15 ± 0,01
45	10,17±0,601	0,13±0,01	7,85±1,54	0,15 ± 0,05
60	6,95±0,442	0,12±0,01	6,78±0,65	0,13 ± 0,05

22% fibra				
T (°C)	G'		G''	
	k' (Pa·s ^{n'})	n'	k'' (Pa·s ^{n''})	n''
5	51,62±7,54	0,21± 0,03	20,57±1,76	0,22±0,14
15	22,75±1,13	0,12± 0,04	9,42±0,12	0,21±0,05
30	20,86±0,70	0,13± 0,04	9,39±0,20	0,20±0,05
45	20,36±0,80	0,14± 0,05	8,81±0,50	0,20±0,04
60	13,38±0,98	0,12± 0,05	7,79±0,32	0,16±0,05

5.3 Caracterización Reológica del zumo de naranja con fibra añadida

5.3.1 Tixotropía del zumo de naranja con fibra añadida

Se han estudiado las propiedades reológicas del zumo de naranja. Para poder cuantificar el comportamiento tixotrópico, se han ajustado los datos experimentales a la ecuación de Figoni-Shomaker, para poder describir la dependencia con el tiempo. El estudio de la tixotropía se realizó en un rango de temperatura entre 5 a 60 °C. El modelo describe el comportamiento tixotrópico en una constante cinética de descomposición de la estructura interna del zumo de naranja. Además, este modelo permite cuantificar la ruptura de la estructura mediante los parámetros ($\sigma_0 - \sigma_e$) y la cantidad de estructura restante con el parámetro σ_e . Un aumento en la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$) causa un aumento en el esfuerzo cortante inicial (σ_0), en el esfuerzo cortante de equilibrio (σ_e) y en su diferencia ($\sigma_0 - \sigma_e$), lo que demuestra que un aumento en la velocidad de deformación aplicada causa una mayor ruptura interna de la estructura. Por otro lado, un aumento en la temperatura causa una disminución en el esfuerzo cortante inicial (σ_0), en el esfuerzo

cortante de equilibrio (σ_e) y en su diferencia ($\sigma_0 - \sigma_e$), lo que demuestra que un aumento en la temperatura causa una mayor ruptura interna de la estructura. La constante cinética (k) aumenta cuando aumentan tanto la velocidad de deformación como la temperatura, por lo que la velocidad de ruptura de la estructura aumenta si aumentan las velocidades de deformación y las temperaturas.

5.3.2 Efecto de la concentración de fibra sobre la tixotropía en el zumo de naranja

Los parámetros obtenidos con el ajuste de los datos experimentales fueron ajustados a la ecuación definida por Figoni y Shoemaker. Observando en primer lugar los coeficientes de determinación, se ve como todos superan el 90%, lo que indica que el modelo resulta útil para describir la evolución del esfuerzo cortante con el tiempo.

Para todas las concentraciones de fibra en el zumo de naranja a diferentes temperaturas, el parámetro que mide la cantidad de ruptura estructural del cizallamiento ($\sigma_0 - \sigma_e$) aumenta progresivamente con el contenido de fibra, encontrándose un comportamiento tixotrópico cuando las muestras alcanzaron 10% de fibra. También se puede observar en la Tabla 14, que el valor de la constante de k velocidad de degradación estructural disminuye a medida aumenta la concentración, lo que indica que la velocidad con que se destruye la estructura para las muestras menores de 8% de fibra es superior que para las muestras mayores de 10% de fibra. Este mismo comportamiento fue observado para pulpas de frutas concentradas por Lozano e Ibarz (1994).

Se puede observar cómo estos resultados demuestran que el esfuerzo cortante de equilibrio, σ_e (Pa), aumenta con el aumento de la concentración de fibra, lo que significa que a medida que aumenta la cantidad de fibra, incrementará la viscosidad aparente final.

Analizando una determinada concentración de fibra, se puede observar que el esfuerzo cortante de equilibrio σ_e (Pa) aumenta, a medida disminuye la temperatura. La

disminución en el esfuerzo cortante de equilibrio y en el esfuerzo cortante inicial (σ_0) a medida aumenta la temperatura es típico de los zumos de frutas (Cepeda *et al.*, 1999).

Considerando los porcentajes de fibra se puede observar que los valores mayores de k se mostraron en las muestras con porcentajes de fibra menores y por otro lado los menores porcentajes de k se observaron en las muestras con mayor porcentaje de fibra, lo que indica que la velocidad con que se destruye la estructura es mayor a menor porcentaje de fibra. También se observa que, para un determinado porcentaje de fibra, la constante de k aumenta con el aumento de la temperatura, confirmando que las muestras a temperaturas más elevadas presentan un menor comportamiento tixotrópico. Este comportamiento ha sido reportado en un estudio de concentrado de naranja y puré de membrillo (Ramos e Ibarz 1998).

Tabla 15. Valores de los parámetros reológicos del Modelo Figoni-Shoemaker en función del porcentaje de fibra y temperatura a una velocidad de cizalla de 100 s^{-1}

Cf (%)	T (°C)	k (s^{-1})	σ_0 (Pa)	σ_e (Pa)	$\sigma_0 - \sigma_e$ (Pa)	R^2
18	5	0,0041±0,0004	43,33±2,24	39,62±1,07	3,71	0,8863
18	15	0,0033±0,0007	33,29±1,74	29,91±2,28	4,60	0,9857
18	30	0,0061±0,0007	23,05±1,63	20,51±1,23	2,54	0,9777
18	45	0,0068±0,0004	15,63±1,41	13,54±1,21	2,09	0,9959
18	60	0,0071±0,0009	13,24±0,96	10,48±0,95	2,76	0,9714
16	5	0,0068±0,0002	27,25±0,78	24,42±0,14	2,83	0,9351
16	15	0,0066±0,0009	21,87±1,39	19,13±0,85	2,12	0,9997
16	30	0,0055±0,0008	14,24±1,54	12,23±0,32	2,01	0,9754
16	45	0,0067±0,0007	10,92±0,47	8,92±0,21	2,00	0,9959
16	60	0,0060±0,0011	8,72±0,32	7,14±0,04	1,53	0,9992
14	5	0,0048±0,0009	23,18±1,11	20,61±0,74	2,57	0,9961

14	15	0,0049±0,0006	19,16±0,68	16,04±0,41	3,12	0,9887
14	30	0,0059±0,0002	11,91±0,98	9,57±0,35	2,34	0,9446
14	45	0,0062±0,0007	9,12±0,14	7,03±0,14	2,09	0,9957
14	60	0,0066±0,0009	7,73±2,14	5,45±0,17	2,28	0,9759
12	5	0,0037±0,0007	12,23±2,15	9,46±0,06	2,77	0,9382
12	15	0,0040±0,0008	9,15±1,26	7,39±0,14	1,76	0,9905
12	30	0,0059±0,0010	6,00±0,54	4,55±0,07	1,45	0,9734
12	45	0,0062±0,0011	4,65±0,61	3,36±0,09	1,29	0,9891
12	60	0,0066±0,0021	3,94±1,36	2,60±1,14	1,30	0,9654
10	5	0,0036±0,0012	9,11±0,19	5,63±1,23	3,48	0,9357
10	15	0,0028±0,0009	6,20±0,14	4,47±0,25	1,47	0,9892
10	30	0,0057±0,0013	4,29±0,20	2,98±0,24	1,31	0,9738
10	45	0,0062±0,0020	3,46±1,12	2,30±0,96	1,16	0,9889
10	60	0,0067±0,0018	3,01±1,07	1,79±0,91	1,22	0,9974

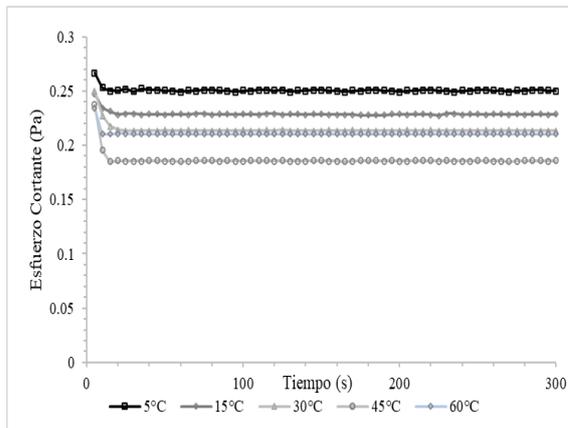
5.3.3 Efecto de la temperatura sobre la tixotropía del zumo de naranja

El efecto de la temperatura en el comportamiento tixotrópico del zumo de naranja con fibra añadida se puede observar claramente en Tabla 18, donde se observa que al aumentar la temperatura se reduce el grado tixotrópico de las muestras, es decir, que la degradación estructural de las muestras disminuye cuando aumenta la temperatura, siendo menor la disminución del esfuerzo cortante. Resultados similares se observaron en cuanto a la influencia de la temperatura en el estudio de caracterización de jugo concentrado de mandarina (Falguera *et al.*, 2010), jugo de *Malus floribunda* (Cepeda *et al.*, 1999), mermelada de piña (Basu *et al.*, 2007), pulpa de durazno y ciruela (Lozano e Ibarz, 1994).

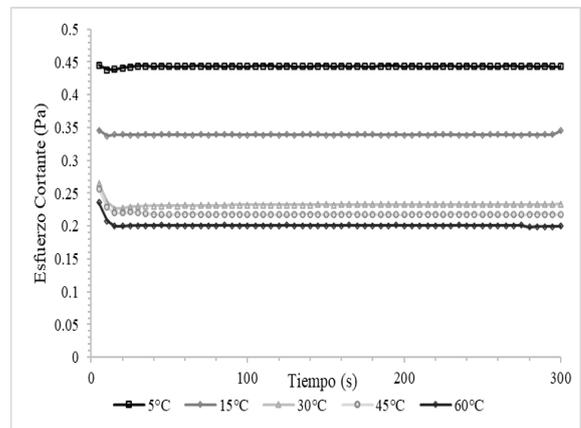
En la Figura 40, se puede observar que hay un aumento pronunciado en el carácter tixotrópico a partir del 10% de fibra, mientras que para las concentraciones menores de 10% de fibra (Figura 39) la dependencia del tiempo es menor y la estructura de la

tixotropía en estas concentraciones es muy débil. También se puede observar, que el esfuerzo cortante a una velocidad de deformación final es sensible al tiempo de deformación, específicamente en los primeros 30 segundos, en donde el esfuerzo cortante baja rápidamente con el tiempo de deformación, y que, por lo tanto, todas las muestras presentan hasta cierto punto un carácter tixotrópico. Adicionalmente, se observa que la degradación estructural de las muestras disminuye a medida que se incrementa la temperatura, siendo menor la disminución del esfuerzo cortante.

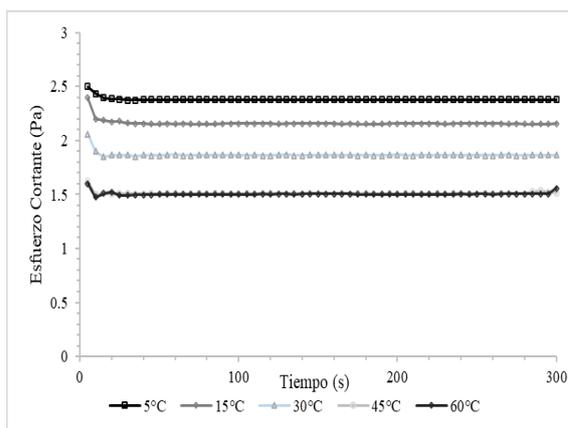
a)



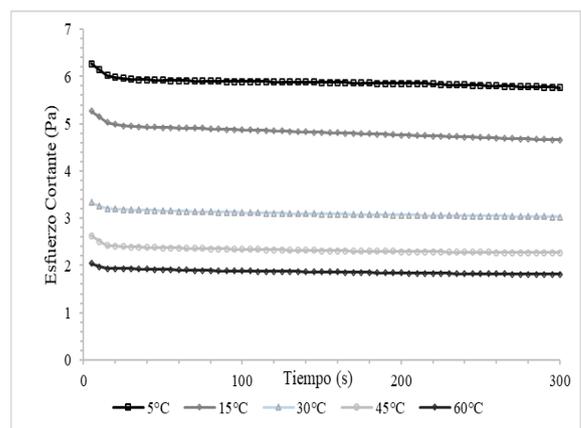
b)



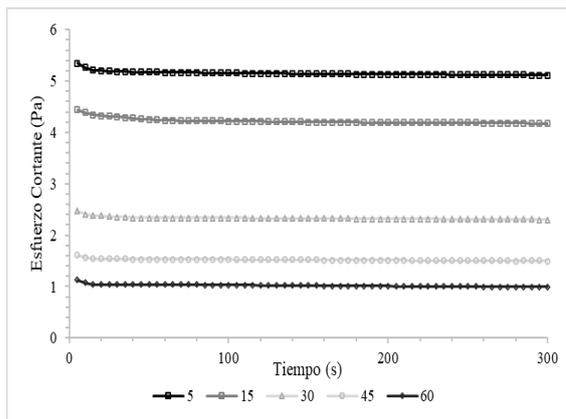
c)



d)



e)



(a) disolución al 0%

(b) disolución al 2%

(c) disolución al 4%

(d) disolución al 6%

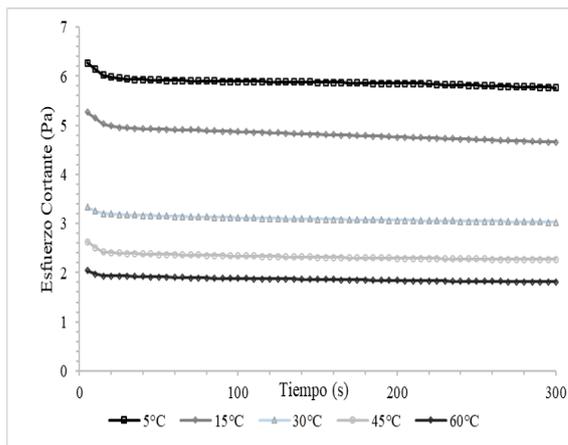
(e) disolución al 8%

Figura 39. Variación del esfuerzo cortante con el tiempo para el zumo de naranja de 0 a 8 % de fibra a diferentes temperaturas. Modelo Figoni Shoemaker.

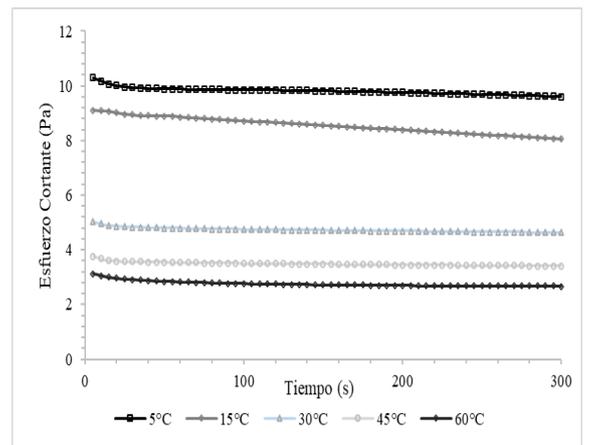
La existencia de tixotropía se pone de manifiesto con la disminución del esfuerzo cortante con el transcurso del tiempo durante la aplicación de una velocidad de deformación constante. La Figura 36 muestra los resultados obtenidos en las medidas reológicas realizadas de 10 a 18% a temperaturas de 5 a 60 °C.

La Figura 40, muestra con claridad como el esfuerzo que opone la muestra en la rotación del sensor decrece a medida que pasa el tiempo, es decir, que la torsión que debe aplicar el reómetro para mantener constante la velocidad de rotación se va haciendo menor, esto se puede observar en todos los rangos de temperatura estudiados. Es importante establecer que, a temperaturas más elevadas, los esfuerzos iniciales y finales son más elevados, por lo tanto, se puede concluir que el zumo de naranja a partir de 10% de fibra presenta tixotropía y que la temperatura interviene considerablemente en su comportamiento.

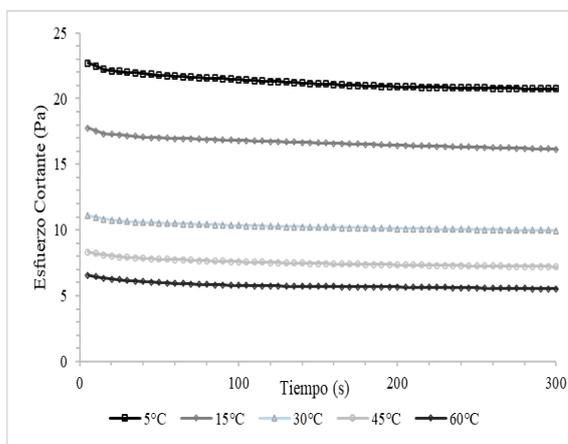
a)



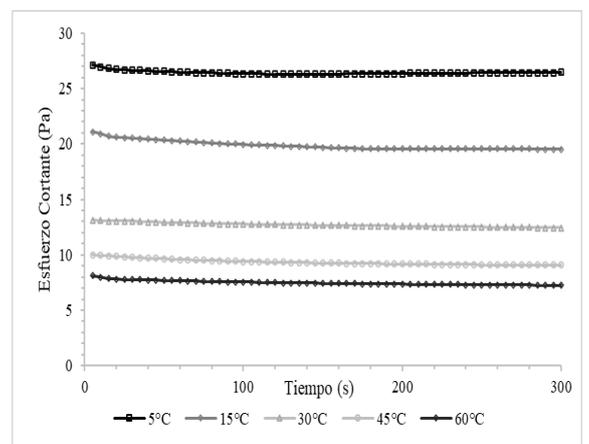
b)



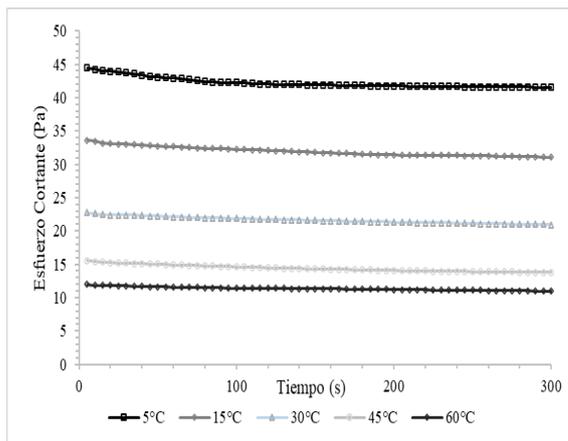
c)



d)



e)



(a) disolución al 10%

(b) disolución al 12%

(c) disolución al 14%

(d) disolución al 16%

(e) disolución al 18%

Figura 40. Variación del esfuerzo cortante con el tiempo para el zumo de naranja de 10 a 18 % de fibra a diferentes temperaturas. Modelo Figni Shoemaker

5.3.4 Comportamiento al flujo zumo de naranja con fibra

Las Figuras 41-45 muestran los reogramas obtenidos en los ensayos de comportamiento al flujo del zumo de naranja a diferentes concentraciones de fibra a temperaturas de entre 5 a 60 °C. Estos reogramas corresponden a una curva característica de un fluido pseudo-plástico (si el umbral de fluencia es nulo) o bien de Herschel-Bulkley (si es diferente de cero), tal como es usual en los zumos de fruta que contienen pulpa y pectinas (Falguera e Ibarz, 2010). Los resultados del ajuste de los datos experimentales al modelo de Herschel-Bulkley, calculados mediante regresiones no lineales, se muestran en la Tabla 15. Los parámetros son similares a los obtenidos en este trabajo para el zumo de manzana, limón y mandarina.

La pendiente de las líneas rectas obtenidas, es decir, la viscosidad, varía considerablemente dependiendo de la temperatura, disminuyendo a medida que aumenta esta variable. Adicionalmente, esta viscosidad varía dependiendo de la concentración de fibra, aumentando a medida que este factor aumenta. Así, la viscosidad del zumo de naranja en todas las concentraciones disminuye cuando la temperatura pasa de 5C a 60 °C. Los coeficientes de determinación son en todos los casos superiores al 99%, lo que muestra lo adecuado del ajuste y la validez de la ecuación de Herschel-Bulkley.

Se observa en los reogramas un aumento de la consistencia de la muestra a medida que aumenta el contenido de fibra y la temperatura disminuye. Analizando la representación gráfica de los resultados obtenidos del zumo de naranja entre la variación del esfuerzo cortante (σ) y la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$), a las diferentes concentraciones y temperaturas estudiadas, se observa una curva de comportamiento de fluido newtoniano para los reogramas de 0 a 8% de contenido de fibra a todas las temperaturas. También se observa que, para las distintas temperaturas ensayadas, los

valores que alcanza el esfuerzo cortante se hacen mayores a medida que aumenta la velocidad de deformación.

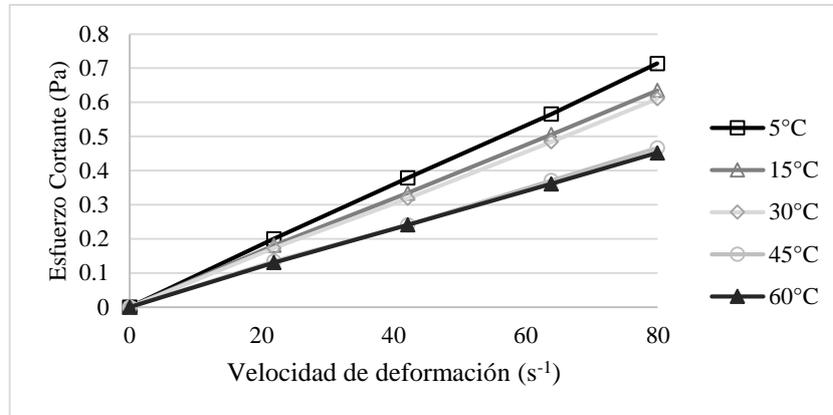


Figura 41. Reograma para zumo de naranja a concentración de 0% de fibra a todas las temperaturas.

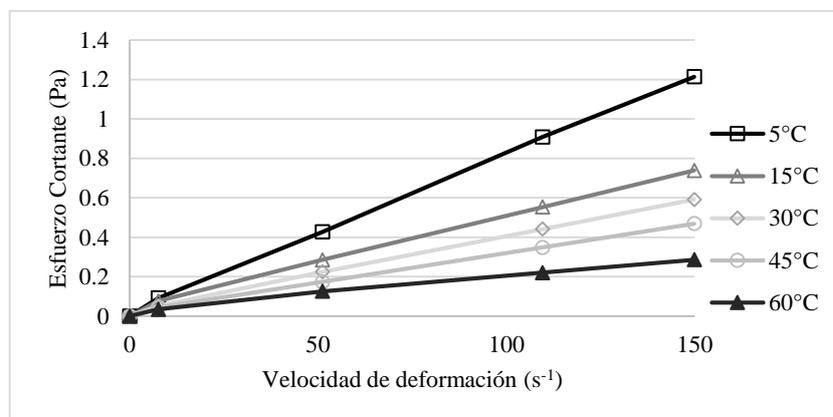


Figura 42. Reograma para zumo de naranja a concentración de 2% de fibra a todas las temperaturas.

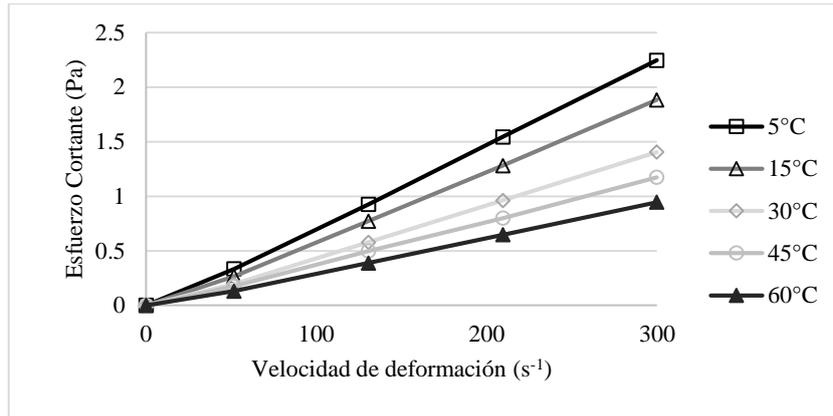


Figura 43. Reograma para zumo de naranja a concentración de 4% de fibra a todas las temperaturas.

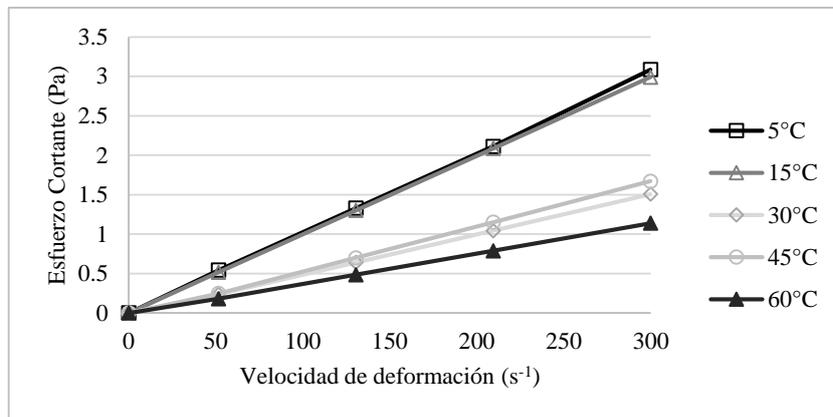


Figura 44. Reograma para zumo de naranja a concentración de 6% de fibra a todas las temperaturas.

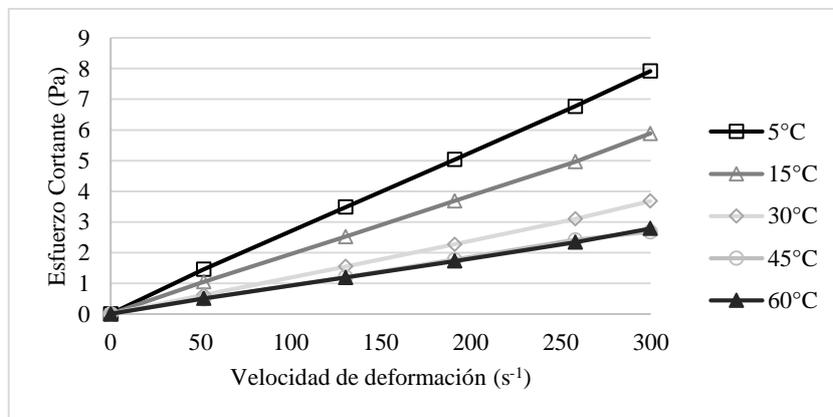


Figura 45. Reograma para zumo de naranja a concentración de 8% de fibra a todas las temperaturas.

Analizando las Figuras 46-50, se puede observar que la evolución del esfuerzo cortante (σ) con la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$) obtenida experimentalmente para el zumo de naranja a concentraciones de 10 a 18% en contenido de fibra y para el rango de temperatura de 5 a 60 °C, presenta curvas de un fluido pseudo-plástico, donde el esfuerzo cortante aumenta con el aumento de la velocidad de deformación según una función potencial. Por otro lado, la muestra de zumo de naranja con 18% Cf se comportan como un fluido Herschel-Bulkely. También se puede analizar, que, para la misma temperatura, la viscosidad aumenta con el contenido de fibra, por ejemplo, a 5 °C, es de 0,004 Pa.s para la muestra 0% de fibra y de 1,16 Pa.s para 18% Cf. Por otro lado, el aumento de la viscosidad con la disminución de la temperatura es más pronunciado cuanto más aumenta la concentración de fibra. Para las concentraciones bajas de 0 a 8% Cf, los valores aumentan ligeramente, mientras que cuanto mayor sea esta tendencia es más pronunciada.

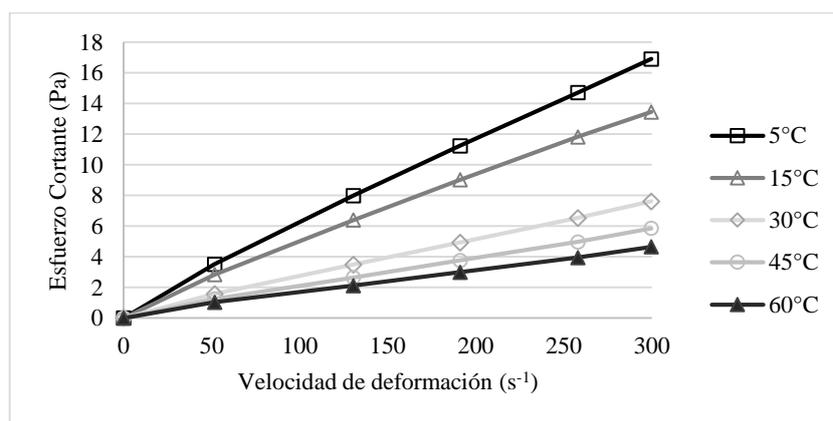


Figura 46. Reograma para zumo de naranja a concentración de 10% de fibra a todas las temperaturas.

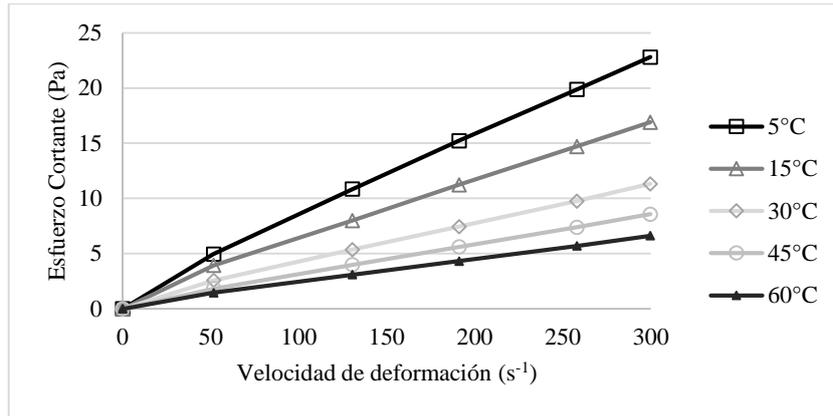


Figura 47. Reograma para zumo de naranja a concentración de 12% de fibra a todas las temperaturas.

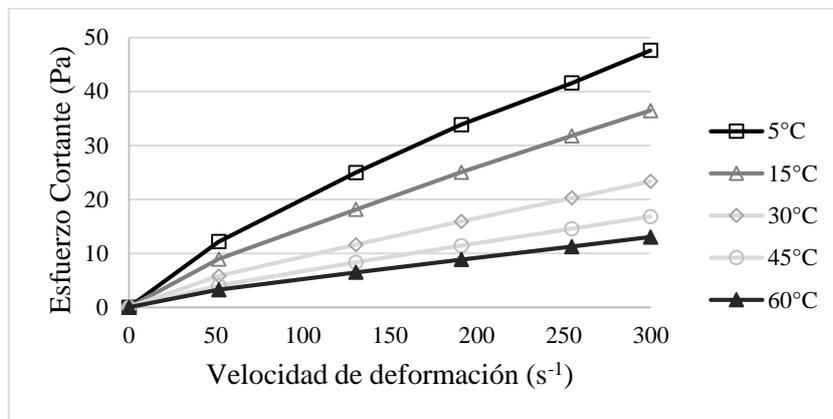


Figura 48. Reograma para zumo de naranja a concentración de 14% de fibra a todas las temperaturas.

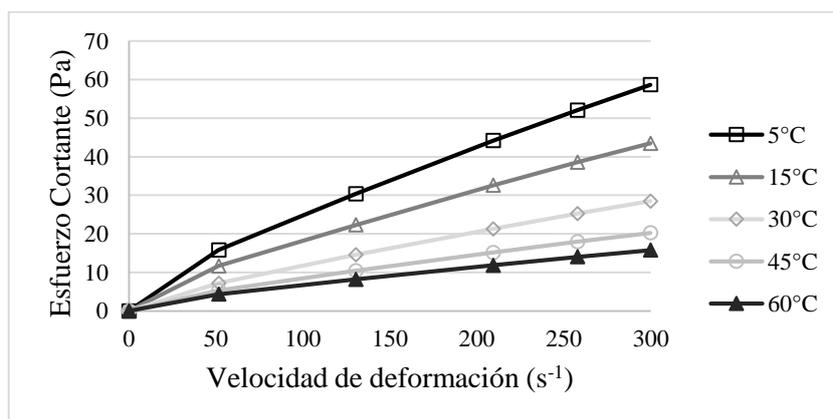


Figura 49. Reograma para zumo de naranja a concentración de 16% de fibra a todas las temperaturas.

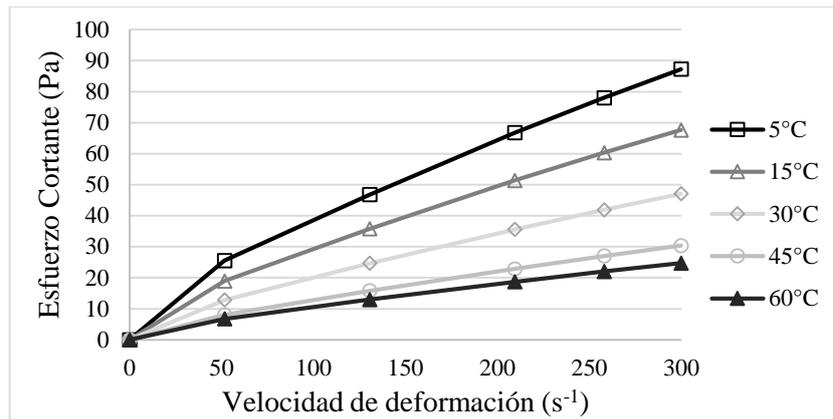


Figura 50. Reograma para zumo de naranja a concentración de 18% de fibra a todas las temperaturas.

Los resultados experimentales de la evolución del esfuerzo cortante con la velocidad de deformación para el zumo de naranja se han ajustado, por el modelo Herschel-Bulkley obteniéndose los valores del índice de consistencia k y del índice de comportamiento al flujo n , para las distintas temperaturas ensayadas. En la Tabla 16, tanto los ajustes como los estimados de los parámetros obtenidos, resultaron significativos en un nivel de probabilidad del 95%. Para cualquier contenido de fibra, dentro del rango de condiciones probadas, a una velocidad de deformación dada, el esfuerzo cortante disminuye con el aumento de la temperatura. Además, el esfuerzo cortante aumenta a medida que aumenta el contenido de fibra. Aunque se sabe que el aumento de la fibra conduce a un producto más consistente, es esencial modelar los cambios en el comportamiento del fluido causados por la adición de fibra. La adición de fibra al zumo de naranja provocó un aumento en el índice de consistencia (k) y una disminución en el índice de comportamiento de flujo (n); para n , de aproximadamente 1 (0-8% Cf) a 0.76 (18% Cf). Un comportamiento similar fue encontrado por Siche *et al.*, (2015), en un estudio del efecto de la temperatura y la concentración de fibra en un zumo de naranja.

El flujo se diferencia progresivamente del comportamiento newtoniano a medida que aumenta el contenido de fibra, lo que se puede observar en el aumento de la pseudo plasticidad (disminución en el índice de comportamiento de flujo). Sobre la base de estos parámetros, se pueden distinguir gráficamente tres zonas, la primera, el área de comportamiento newtoniana, con valores de n similares a 1 y $\sigma_0 = 0$; la segunda área pseudo-plástica, con valores de $n < 1$ y $\sigma_0 = 0$; y la tercera zona de comportamiento Herschel-Bulkley, con valores de $n < 1$ y $\sigma_0 > 0$. El zumo de naranja con contenido de fibra inferior al 8% Cf y temperaturas superiores a 5 °C se comportan como un fluido newtoniano. Es decir, si la temperatura supera los 5 °C, el contenido de fibra debe estar entre 0 y 8% para mantener el comportamiento newtoniano. Mientras tanto, un zumo de naranja con un contenido de fibra del 10% se comportaría como un líquido ley de la potencia para los rangos de temperaturas estudiados, y un zumo de naranja con 18% en contenido de fibra o más a cualquier temperatura entre 0 y 60 °C se comportaría como un líquido Herschel-Bulkley (Tabla 15).

Tabla 16. Valores para los parámetros del modelo Herschel-Bulkley ($0,1 \text{ s}^{-1} < \dot{\gamma} < 300 \text{ s}^{-1}$, con promedio de tres replicas \pm desviación standard).

Fibra (%)	T (°C)	σ_0 (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n	R ²	Comportamiento Reológico
0	60	0,000±0,000	0,004±0,0001	1,000±0,000	0,9974	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,006±0,0003	1,000±0,000	0,9957	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,008±0,0002	1,000±0,000	0,9987	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,008±0,0005	1,000±0,000	0,9957	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,010±0,0006	1,000±0,000	0,9974	Newtoniano
2	60	0,000±0,000	0,003±0,0002	1,000±0,000	0,9970	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,004±0,0001	1,000±0,000	0,9992	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,006±0,0001	1,000±0,000	0,9983	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,007±0,0003	1,000±0,000	0,9960	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,011±0,0001	1,000±0,000	0,9994	Newtoniano
4	60	0,000±0,000	0,003±0,0000	1,000±0,000	0,9989	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,004±0,0001	1,000±0,000	0,9994	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,004±0,0002	1,000±0,000	0,9994	Newtoniano

	15	0,000±0,000	0,005±0,0002	1,000±0,000	0,9991	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,010±0,0003	1,000±0,000	0,9999	Newtoniano
6	60	0,000±0,000	0,003±0,0002	1,000±0,000	0,9996	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,004±0,0001	1,000±0,000	0,9997	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,004±0,0001	1,000±0,000	0,9998	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,005±0,0006	1,000±0,000	0,9997	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,010±0,0005	1,000±0,000	0,9998	Newtoniano
8	60	0,000±0,000	0,008±0,0007	1,000±0,000	0,9994	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,009±0,0005	1,000±0,000	0,9990	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,010±0,0009	1,000±0,000	0,9996	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,019±0,0009	1,000±0,000	0,9997	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,030±0,0002	0,986±0,000	0,9999	Newtoniano
10	60	0,010±0,006	0,021±0,0012	0,942±0,014	0,9986	Ley Potencia
	45	0,011±0,003	0,036±0,0019	0,941±0,021	0,9992	Ley Potencia
	30	0,086±0,007	0,047±0,0035	0,931±0,022	0,9996	Ley Potencia
	15	0,117±0,010	0,086±0,0045	0,899±0,011	0,9999	Ley Potencia
	5	0,382±0,030	0,099±0,0047	0,894±0,012	0,9999	Ley Potencia
12	60	0,111±0,004	0,034±0,0016	0,992±0,052	0,9991	Ley Potencia
	45	0,120±0,004	0,045±0,0010	0,984±0,003	0,9994	Ley Potencia
	30	0,151±0,001	0,069±0,0009	0,991±0,005	0,9996	Ley Potencia
	15	0,171±0,001	0,109±0,0011	0,944±0,004	0,9992	Ley Potencia
	5	0,407±0,019	0,145±0,0013	0,941±0,004	0,9999	Ley Potencia
14	60	0,352±0,023	0,101±0,0005	0,841±0,010	0,9989	Ley Potencia
	45	0,366±0,027	0,129±0,0023	0,849±0,010	0,9995	Ley Potencia
	30	0,399±0,091	0,199±0,0042	0,839±0,031	0,9999	Ley Potencia
	15	0,519±0,101	0,315±0,0014	0,826±0,019	0,9999	Ley Potencia
	5	0,759±0,047	0,522±0,0021	0,789±0,017	0,9999	Ley Potencia
16	60	0,741±0,054	0,139±0,0005	0,820±0,010	0,9989	Ley Potencia
	45	0,902±0,097	0,178±0,0023	0,823±0,010	0,9995	Ley Potencia
	30	1,070±0,082	0,254±0,0042	0,823±0,031	0,9997	Ley Potencia
	15	1,417±0,041	0,411±0,0014	0,814±0,019	0,9994	Ley Potencia
	5	1,444±0,006	0,601±0,0021	0,805±0,017	0,9998	Ley Potencia
18	60	0,882±0,106	0,247±0,0145	0,801±0,009	0,9994	Herschel-Bulkley
	45	0,896±0,111	0,293±0,0094	0,808±0,018	0,9987	Herschel-Bulkley
	30	1,705±0,141	0,524±0,5183	0,783±0,024	0,9994	Herschel-Bulkley
	15	1,749±0,270	0,805±0,8632	0,779±0,037	0,9998	Herschel-Bulkley
	5	2,417±0,165	1,161±0,2011	0,759±0,020	0,9993	Herschel-Bulkley

5.3.5 Efecto de la temperatura sobre el comportamiento al flujo

Para cuantificar el efecto que la temperatura ejerce sobre la consistencia de cada fluido, las estimaciones de viscosidad para los modelos newtonianos y el índice de consistencia para los modelos no newtonianos se ajustaron a una ecuación de tipo Arrhenius (Ecuación 8), obteniendo un par de estimaciones para $\ln k_0$ y E_a para cada contenido de fibra. La Tabla 17. muestra estos parámetros ajustados de Arrhenius obtenidos de los modelos Newton, ley de la potencia y Herschel-Bulkley previamente

ajustados para 0-8%, 10-16% y 18% de contenido de fibra, respectivamente. Como todos los coeficientes de determinación fueron siempre superiores a 0,85 y todos los valores de p claramente inferiores a 0.05, se concluyó que la ecuación de Arrhenius (Ecuación 8) describe adecuadamente el efecto de la temperatura en la consistencia del zumo, independientemente del modelo reológico. Los valores obtenidos para la energía de activación son similares a los obtenidos en otros sistemas (Garvín *et al.*, 2017).

Tabla 17. Parámetros de la ecuación Arrhenius para el Zumo de Naranja

Fibra (%)	E_a (kJ/mol)	ln k₀	R²	k₀ (mPas·sⁿ)
0	9,90	-1,997	0,898	1,36 E-01
2	15,53	-4,489	0,947	1,12 E-02
4	13,42	-3,853	0,854	2,12 E-02
6	14,67	-4,248	0,880	1,43 E-02
8	18,86	-4,920	0,898	1,20 E-02
10	21,87	-4,784	0,979	8,37 E-03
12	23,49	-4,784	0,997	2,02 E-02
14	22,87	-6,064	0,985	2,38 E-02
16	20,63	-3,733	0,990	7,54 E-02
18	22,09	-2,584	0,986	7,83 E-02

La constante k₀ no muestra una tendencia clara con el aumento de la concentración, por otro lado, la energía de activación del flujo sigue una tendencia a aumentar con los porcentajes más altos de fibra. Se puede ver que el efecto de la temperatura al disminuir la viscosidad del zumo de naranja con fibra es más pronunciado con contenidos de fibras más altos. Este comportamiento para el parámetro de la E_a fue observado por Ibarz *et al.*, (1994) e Ibarz *et al.*, (2009) en los estudios del comportamiento al flujo del zumo de naranja clarificado a diferentes temperaturas. En las muestras comparables, las energías de activación obtenidas en ese caso fueron ligeramente inferiores.

5.3.6 Efecto de la concentración sobre el comportamiento al flujo

El efecto de la concentración en el comportamiento reológico del zumo de naranja con fibra añadida puede describirse por el modelo de la potencia (ecuación 10) y por el modelo exponencial (ecuación 9). Para obtener los valores estimados de los modelos anteriores se han ajustado los datos de la Tabla 16 al tipo de ecuaciones citadas. El mejor ajuste se ha obtenido con el modelo exponencial, ya que presenta valores de coeficientes de determinación más elevados. De este modo, para este estudio únicamente se presentan los ajustes a este modelo.

Tabla 18. Influencia del contenido de fibra en la consistencia (índice de consistencia o viscosidad) a cada temperatura. $k = a_1 \exp(b_1 C)$

Temperatura (°C)	a_1 (mPa*s ⁿ)	b_1 (% ⁻¹)	R^2
5	2,8	0,349	0,9491
15	1,6	0,348	0,8746
30	1,6	0,317	0,9412
45	1,2	0,309	0,9499
60	0,9	0,308	0,9586

En la Tabla 18, se presentan los parámetros obtenidos en los ajustes, para las temperaturas estudiadas. En todos los casos los ajustes y los estimados de los parámetros son significativos con un nivel de probabilidad del 95%. Se observa en la Tabla 18, que el comportamiento de la constante de a_1 tiene una tendencia a disminuir a medida aumenta la temperatura, esta misma tendencia se observó en el estudio de influencia de contenido de pulpa en zumo de melocotón clarificado por Ibarz y Ortiz (1993). También se observa que el parámetro de b_1 disminuye al aumentar la temperatura, lo que indica que el efecto

de la concentración es más pronunciado para los valores a temperaturas más bajas, lo que se confirma en los resultados de curvas de flujo, donde el valor de la viscosidad aumenta a altas concentraciones y a temperaturas más bajas.

5.3.7 Compensación Cinética

Los parámetros de la ecuación de Arrhenius de la Tabla 17, se utilizaron para elaborar la Figura 51, en donde se muestra la dependencia de $\ln k_0$ y la energía de activación (E_a) cuando el contenido de fibra aumenta, mostrando dos líneas rectas diferentes, una para los parámetros obtenidos del modelo de Newton para el contenido de fibra de 2 a 8% y otra para los parámetros obtenidos de la ley de la potencia y los modelos Herschel-Bulkely de 10 a 18% contenido de fibra. En este caso en particular, se concluyó la existencia de una compensación en la consistencia del zumo de naranja para diferentes contenidos de fibra. Se determinó que, dado que ambas líneas son diferentes, existe un mecanismo de flujo diferente para cada una de las líneas, es decir uno para el fluido newtoniano y otro para el fluido pseudo plástico.

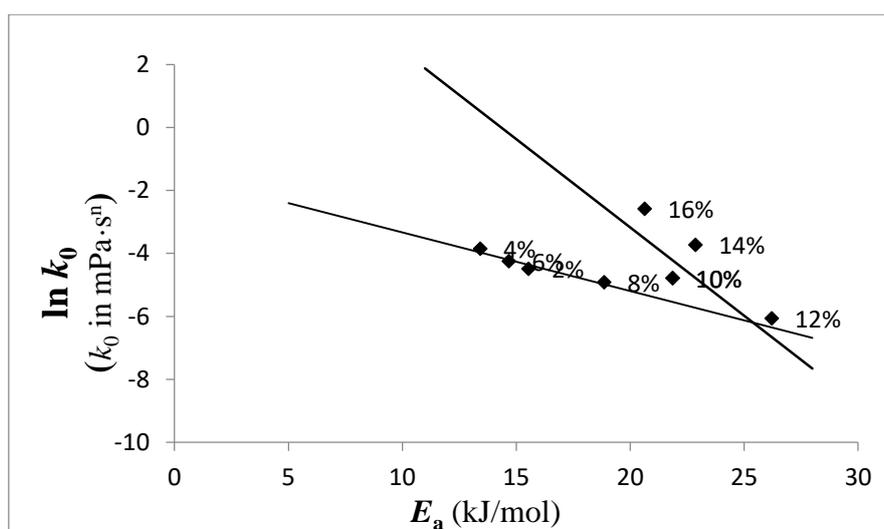


Figura 51. Compensación cinética zumo de naranja con fibra añadida

Se puede observar en la gráfica, como a medida que aumenta el contenido de fibra, a un valor mayor de 10, se presenta un cambio en el modelo reológico de newtoniano a pseudo-plástico y un cambio en el mecanismo del flujo. Adicionalmente, al comparar ambas líneas, el mecanismo de flujo aparentemente cambia para un contenido de fibra mayor a 10%.

Los datos de la Tabla 17 se ajustaron a la Ecuación 16, encontrando las dos líneas que se muestran en la Figura 51. La Tabla 19 muestra las estimaciones y los intervalos de confianza para ambos parámetros y cada modelo.

Tabla 19. Parámetros de la compensación cinética

		Newtoniano	No-Newtoniano
T_{iso} (°C)	Valor	373,60	-58,42
	Intervalo de confianza	249,7 a 497,4	-136,3 a 19,5
$\ln(k_{T_{iso}})$	Valor	-1,471	8,04
	Interval de confianza	-2,85 a -0,45	-18,32 a 17,92
R^2		0,901	0,904

Según la teoría de compensación las Figuras 52 y 53 muestran el hecho que el valor del coeficiente de consistencia o la viscosidad sería el mismo que la temperatura de iso-consistencia para cada modelo. Estas figuras muestran los valores extrapolados en función de la temperatura, considerando que el comportamiento sería el mismo que el encontrado en el rango de temperaturas estudiadas. Las Figura 52 muestra como el logaritmo neperiano de la viscosidad expresada en mPa·s se aproxima al mismo valor -1,471 a la temperatura de 373,60 °C para cada zumo de naranja con contenido de fibra de hasta 8%. La Figura 53 muestra como el logaritmo neperiano del índice de consistencia

expresado en $\text{mPa}\cdot\text{s}^n$ se aproxima al mismo valor de $8,04 \text{ mPa}\cdot\text{s}^n$ a la misma temperatura de $-58,42 \text{ }^\circ\text{C}$ para cada zumo de naranja con contenido de fibra mayor de 10%.

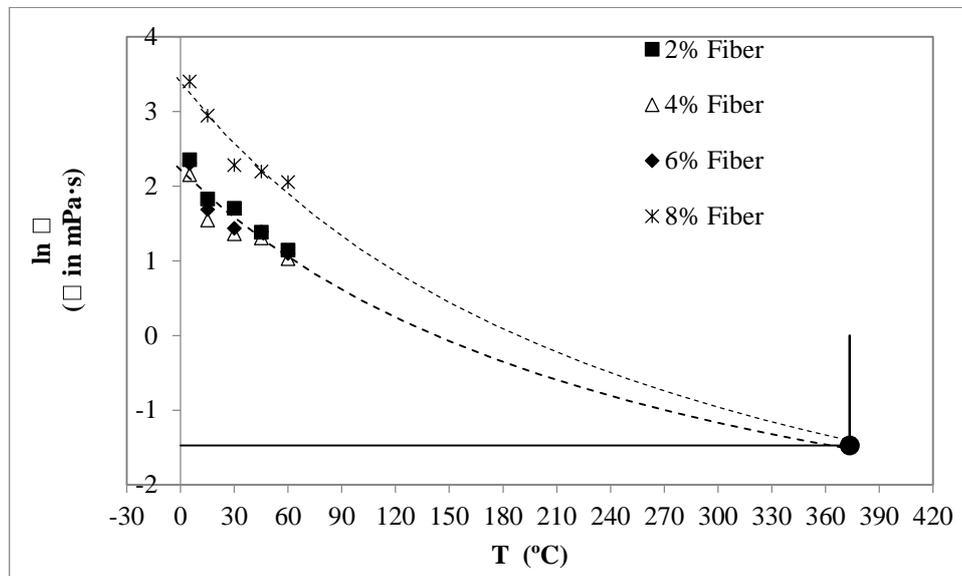


Figura 52. Tendencia de la viscosidad al punto de iso-consistencia para los contenidos de fibra relacionados con el modelo de Newton (<8)

Estas temperaturas a las cuales la viscosidad o los valores del coeficiente de consistencia son los mismos independientemente el contenido de fibra que se llama temperatura de iso-consistencia. Evidentemente, la temperatura de iso-consistencia es solo un concepto y en algunos casos no es posible comprobarlo de forma experimental, como en este caso en específico a las temperaturas de $373,6$ y $-58,4 \text{ }^\circ\text{C}$.

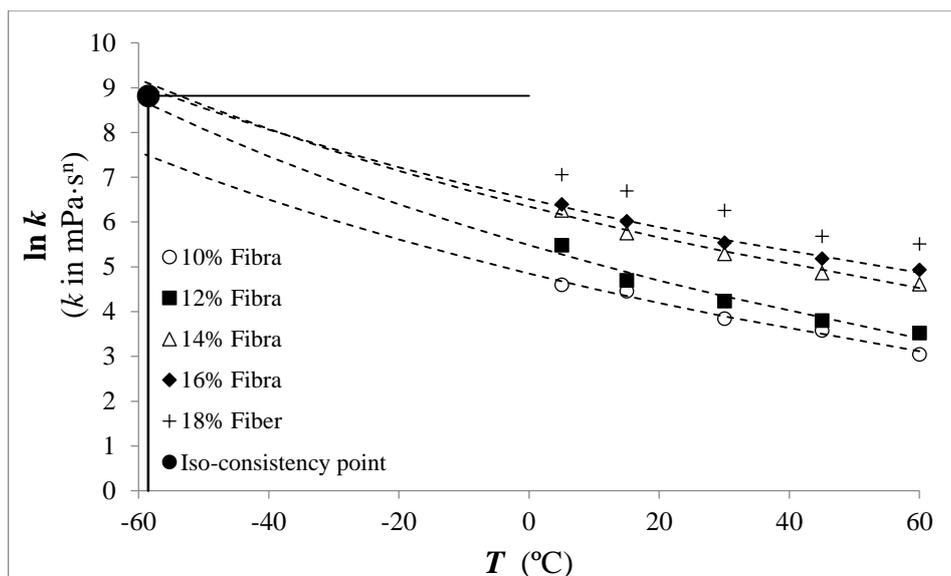
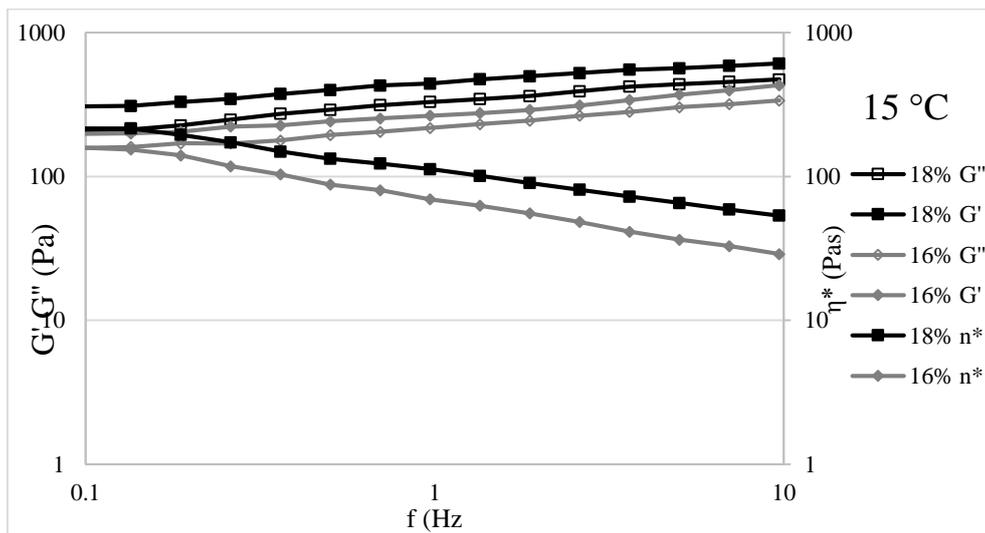
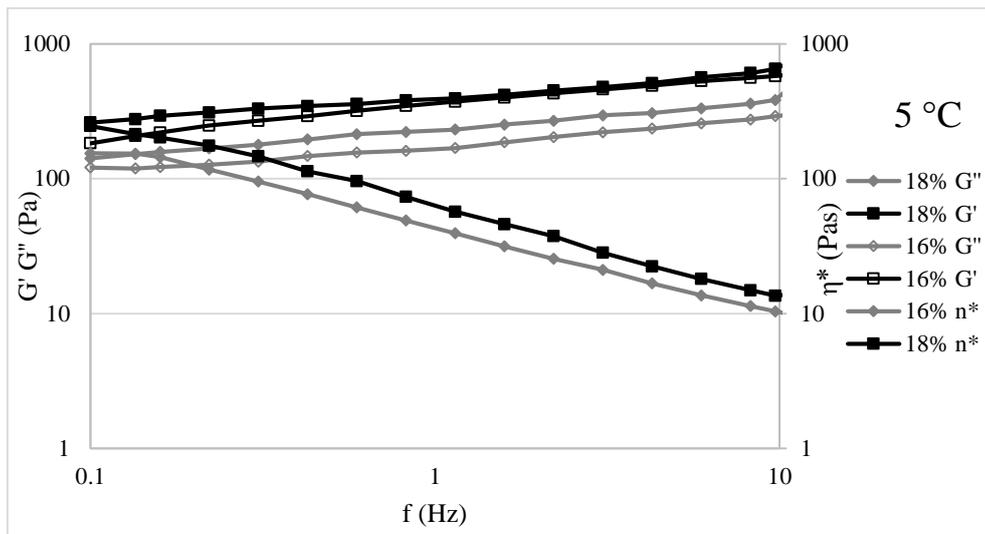


Figura 53. Tendencia del índice de consistencia al punto de iso-consistencia para los contenidos de fibra relacionados con los modelos No-Newtonianos (10-18%).

5.3.8 Caracterización de la viscoelasticidad del zumo de naranja con fibra añadida

Los resultados de los ensayos reológicos experimentales oscilatorios se expresan en término del módulo de almacenamiento (G') y del módulo de pérdida (G''). Si G' es mayor que G'' , el material alimentario exhibe un comportamiento de un semisólido, es decir que tendrá características más viscosas. Por otro lado, si G'' es mayor que G' , el material se comporta como un semilíquido. Los zumos con un contenido en fibra más alto (16 y 18%) presentaron propiedades viscoelásticas. La Figura 54, muestra los barridos de frecuencias llevados a cabo sobre estas dos muestras para un valor del esfuerzo cortante de 1 Pa, y cómo varían los módulos de pérdidas (G') y de almacenamiento (G'') a temperaturas comprendidas entre los 5 y los 60 $^{\circ}\text{C}$. En todos los casos, el módulo de almacenamiento es superior al módulo de pérdidas, por lo que el carácter elástico de la dispersión de fibra en el zumo predomina sobre el viscoso. Así, la muestra puede ser clasificada como un gel débil, tal como sucedió en los estudios de puré de papa (Álvarez

et al., 2007) y el jugo de tomate (Tiziani y Vodovotz, 2005). Los módulos de almacenamiento y pérdida mostraron dependencia de la temperatura, disminuyendo con los aumentos en este parámetro, lo cual es un comportamiento típico de otros productos alimenticios como los alimentos para bebés (Ahmed y Ramaswamy, 2007) y pulpa de jaboticaba (Sato y Cunha, 2007).



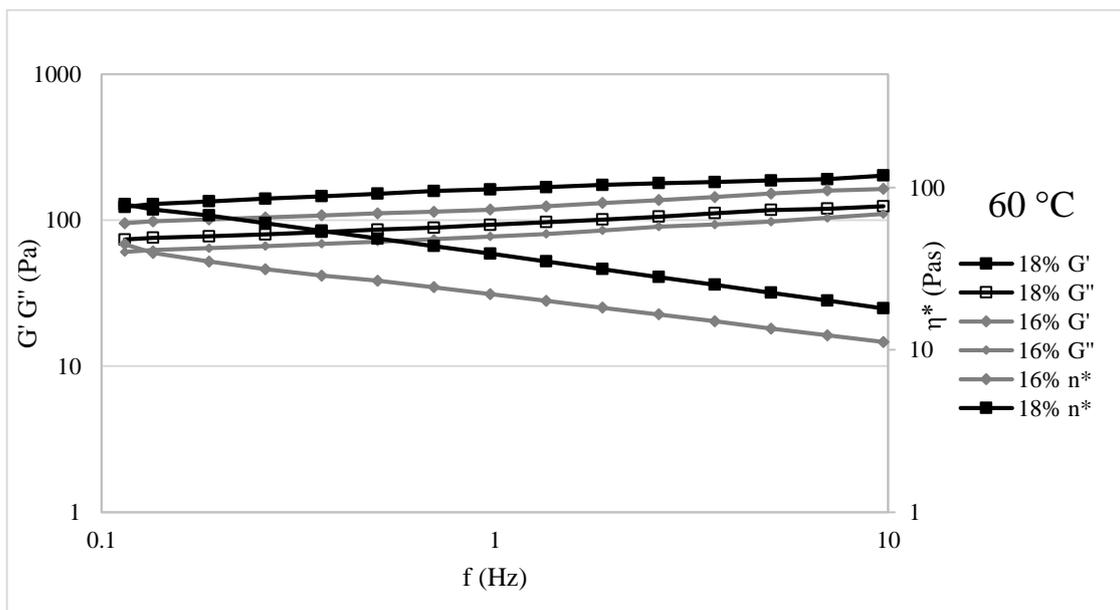
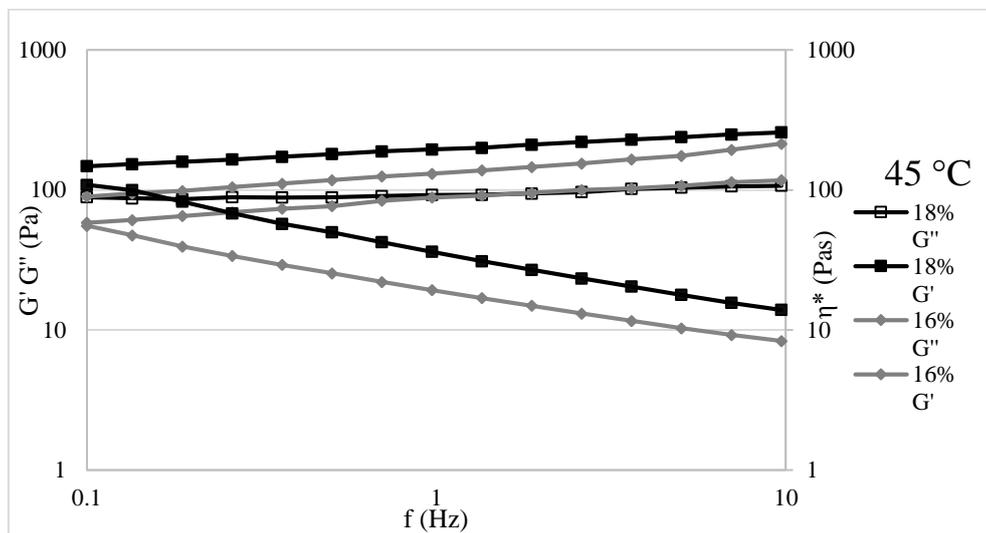
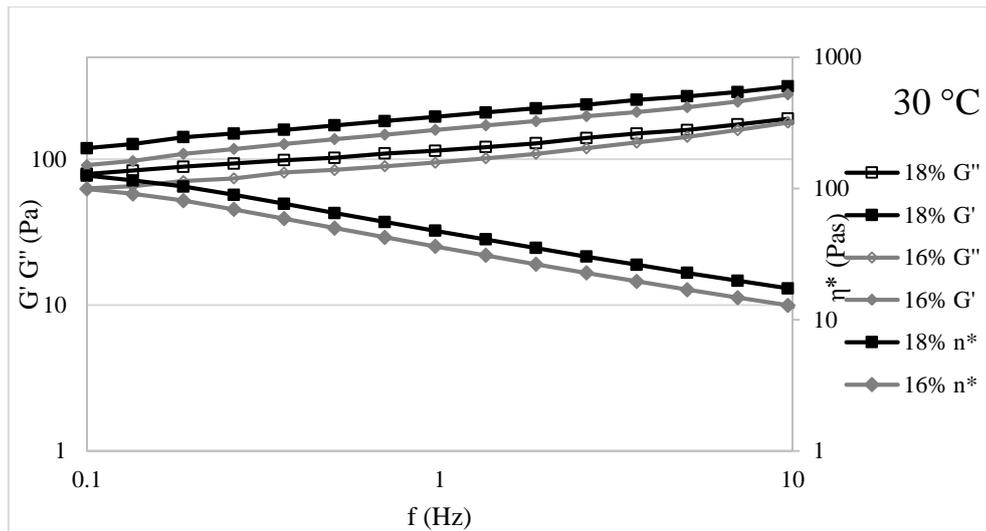


Figura 54. G' y viscosidad compleja obtenida del barrido de frecuencia (0,01 a 10 Hz) para un esfuerzo cortante de 1 Pa. 18% y 16% contenido de fibra a 5 °C, 15 °C, 30 °C, 45 °C y 60 °C.

Se representaron las características reológicas de la influencia de la fibra en el zumo de naranja, utilizando un modelo matemático simple. Se verificó una relación de tipo ley de la potencia para los datos reológicos dinámicos del zumo. Los parámetros k' , k'' , n' , y n'' , son los parámetros de regresión que relacionan G y ω . Los detalles de regresión de las ecuaciones anteriores se presentan en la Tabla 20, para los diferentes productos a cada temperatura. Este coeficiente de regresión mostró que la muestra de jugo de naranja con un 18% de fibra agregada en el rango de temperatura exhibió un comportamiento más sólido con una mayor magnitud de k' (246,51-95,96 Pa·sⁿ) que k'' (159,23-57,40 Pa·sⁿ). Se observó el mismo comportamiento para la muestra de jugo de naranja con 16% de fibra agregada que exhibió un valor de k' (199,38-77,07 Pa·sⁿ) mayor que k'' (109,11-48,54 Pa·sⁿ). Para los valores de n' y n'' , la muestra de jugo de naranja con 18% de fibra agregada mostró un valor de rango de 0,21-0,19 y 0,23-0,21, respectivamente y para la muestra de 16% los valores de fibra agregada variaron entre 0,20-0,18 y 0,21 -0,19, lo que muestra que el parámetro de n' disminuye, mientras que n'' aumenta, afirmando que las temperaturas representan una variable importante para el comportamiento viscoso.

El zumo de naranja con un contenido en fibra del 18% muestra valores de k' y k'' superiores a los correspondientes a la muestra con el 16% de fibra, y disminuyendo estos dos parámetros al aumentar la temperatura. La misma tendencia también se encuentra en n' , manifestándose a la inversa en n'' . Este comportamiento implica que, al incrementar la temperatura, el zumo de naranja con fibra aumenta su carácter viscoso y disminuye su carácter elástico, para las dos concentraciones de fibra.

Tabla 20. Parámetros de la ley de potencia para la correlación entre el almacenamiento y los módulos de pérdida (G' y G''), en función de la frecuencia oscilatoria (ω) (1 pa, media de tres repeticiones \pm desviación estándar).

16% fibra				
T (°C)	G'		G''	
	k' (Pa·s ⁿ)	n'	k'' (Pa·s ⁿ)	n''
5	199,38±34,46	0,20±0,05	109,11±9,89	0,21±0,02
15	158,93±13,67	0,19±0,06	99,39±0,75	0,20±0,09
30	155,65±18,71	0,19±0,07	86,97±3,67	0,20±0,04
45	85,55±12,31	0,18±0,07	53,65±0,52	0,19±0,03
60	77,07±9,49	0,18±0,01	48,54±0,11	0,19±0,06
18% fibra				
T (°C)	G'		G''	
	k' (Pa·s ⁿ)	n'	k'' (Pa·s ⁿ)	n''
5	246,51±13,07	0,21±0,05	159,23±12,73	0,23±0,06
15	218,43±18,88	0,21±0,07	146,95±10,31	0,23±0,04
30	144,87±16,05	0,20±0,07	81,99±10,06	0,22±0,08
45	125,34±13,86	0,20±0,05	72,45±10,19	0,22±0,06
60	95,96±9,32	0,19±0,04	57,40±8,50	0,21±0,07

5.4 Caracterización Reológica del zumo de mandarina con fibra añadida

5.4.1 Tixotropía del zumo de mandarina con fibra añadida

La dependencia del tiempo está relacionada con el cambio estructural debido a la cizalla (Ramos e Ibarz 1998), es decir, la destrucción de estructura interna durante el flujo (Cepeda *et al.*, 1999). En consecuencia, la caracterización reológica dependiente del tiempo es extremadamente importante para comprender los cambios de los productos que ocurren durante el proceso. El zumo de mandarina con fibra fue sometido a un gradiente

de deformación constante para evaluar si presenta características reológicas dependientes del tiempo.

No se observó una disminución del esfuerzo cortante con el tiempo durante la aplicación de una velocidad de deformación constante, para las muestras de 0 y 4% de fibra, para los intervalos de temperaturas de 5 a 60 °C. Por lo tanto, este tipo de zumo no es tixotrópico, ya que su comportamiento reológico no depende del tiempo. Por otro lado, para las temperaturas de 5 a 30 °C se puede observar, la presencia de tixotropía, para las muestras con 8-10% de fibra muestran como el esfuerzo cortante decrece a medida que pasa el tiempo, es decir, el par de torsión que se debe aplicar el reómetro para mantener constante la velocidad de rotación se va haciendo menor. Esto se observa para todos los intervalos de temperatura. También se observa como a la temperatura más baja los esfuerzos iniciales y final son más elevados y la variación es también más intensa. Por tanto, puede concluirse que el zumo de mandarina con 8-10% de fibra presenta tixotropía, y que la temperatura también incide en su comportamiento.

5.4.2 Efecto de la concentración de fibra sobre la tixotropía

En la Tabla 21, se encuentran los parámetros obtenidos con el ajuste de los datos experimentales a la ecuación definida por Figoni-Shoemaker. Observando en primer lugar los coeficientes de determinación, se ve como todos superan el 90%, lo que indica que el modelo resulta útil para describir la evolución del esfuerzo cortante con el tiempo.

Se pudo observar que para el zumo de mandarina a concentración de 0 a 4%, no presentaba tixotropía y que para los porcentajes de fibra de 6 a 10% se observó tixotropía, y ésta fue en aumento a medida que se incrementó el contenido de fibra.

Adicionalmente, se observa que la degradación estructural de las muestras disminuye a medida incrementa la temperatura, siendo menor la disminución del esfuerzo

cortante. Los resultados mostrados en la Tabla 21 demuestran que el esfuerzo cortante de equilibrio, σ_e (Pa), aumenta con el aumento de la concentración de fibra, lo que significa que a medida que aumenta la cantidad de fibra, se incrementará la viscosidad aparente final. Analizando una determinada concentración de fibra, se puede observar que el esfuerzo cortante de equilibrio σ_e (Pa) aumenta a medida disminuye la temperatura.

Para las concentraciones de fibras estudiadas del zumo de mandarina se observa que el parámetro que representa una medida de la cantidad de estructura que se ha destruido durante el cizallamiento ($\sigma_0 - \sigma_e$) aumenta de forma progresiva a medida que aumenta el contenido de fibra. Para el contenido de fibra de 6%, la cantidad de estructura que se ha destruido durante el cizallamiento ($\sigma_0 - \sigma_e$) es de 9,63 Pa a 60 °C y de 4,12 Pa a 5 °C, de igual este parámetro aumenta con el porcentaje de fibra de 10% de 153,94 Pa a 60 °C y de 214,88 Pa a 5 °C, observándose también la influencia de la temperatura. Estos parámetros indican que la adición de fibra sobre la tixotropía tiene una incidencia importante y que tanto la concentración de fibra como la temperatura van a influir en las características del flujo especialmente en las mientras que contengan un mayor porcentaje de fibra.

Tabla 21. Valores de los parámetros reológicos del Modelo Figoni-Shoemaker en función del porcentaje de fibra y temperatura a una velocidad de cizalla de 100 s⁻¹

Cf (%)	T (°C)	k (s ⁻¹)	σ_0 (Pa)	σ_e (Pa)	($\sigma_0 - \sigma_e$) (Pa)	R ²
10	5	0,005±0,0002	745,42±174,12	530,54±98,21	214,88	0,9548
10	15	0,008±0,0005	685,51±36,78	546,33±65,23	139,18	0,9966
10	30	0,024±0,0070	631,11±41,10	487,70±33,52	143,41	0,9688
10	45	0,070±0,0053	657,82±36,25	533,27±36,45	124,55	0,9234

10	60	0,019±0,0005	483,36±64,07	326,42±45,21	153,94	0,9851
8	5	0,012±0,0078	439,28±52,19	203,53±21,10	236,07	0,9896
8	15	0,019±0,0070	295,69±17,14	220,12±19,23	75,57	0,9968
8	30	0,016±0,0027	270,72±14,77	220,64±12,30	49,36	0,9832
8	45	0,014±0,0027	162,41±23,65	122,87±47,20	39,54	0,9601
8	60	0,086±0,0360	166,41±20,33	145,32±3,52	21,09	0,9381
6	5	0,062±0,0032	100,24±10,22	90,61±3,22	9,63	0,9887
6	15	0,075±0,0064	89,56±8,36	80,94±2,25	8,62	0,9905
6	30	0,062±0,0012	85,15±11,33	79,04±5,64	6,11	0,9275
6	45	0,091±0,0004	15,14±2,36	11,92±1,03	3,22	0,9165
6	60	0,141±0,0023	15,10±4,39	10,98±2,32	4,12	0,9064

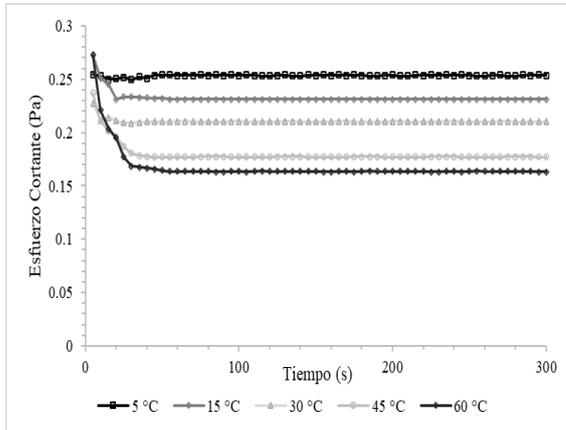
Considerando los porcentajes de fibra se puede observar que los valores mayores de k se mostraron en las muestras con porcentajes de fibra menores y por otro lado los menores porcentajes de k se observaron en las muestras con mayor porcentaje de fibra, lo que indica que la velocidad con que se destruye la estructura es mayor a menor porcentaje de fibra. También se observa que, para un determinado porcentaje de fibra, la constante de k aumenta con el aumento de la temperatura, confirmando que las muestras a temperaturas más elevadas presentan un menor comportamiento tixotrópico.

5.4.3 Efecto de la temperatura sobre la tixotropía del zumo de mandarina

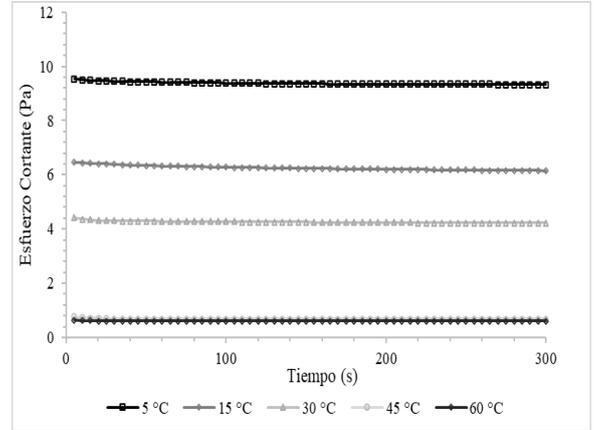
El efecto de la temperatura en el comportamiento tixotrópico del zumo de mandarina se puede ver claramente en las Figuras 55, donde se observa que un aumento de la temperatura reduce el grado tixotrópico de las muestras, es decir que la degradación estructural de las muestras disminuye cuando la temperatura aumenta. Si se hace una comparación entre los tixogramas de zumo de mandarina a las diferentes concentraciones

de fibra, se observa una bajada del esfuerzo cortante, siendo ésta también más prolongada, mostrando mayores grados tixotrópicos las muestras de 8 y 10% de fibra.

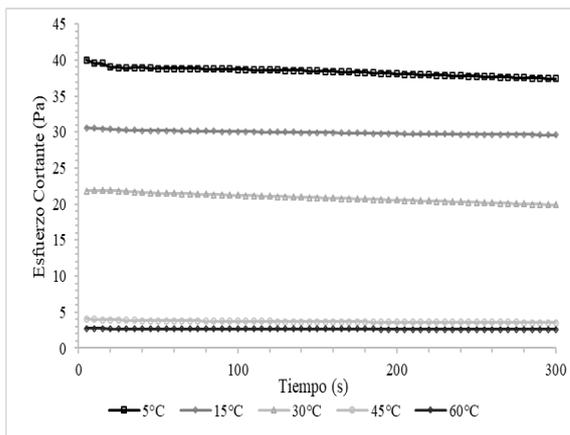
a)



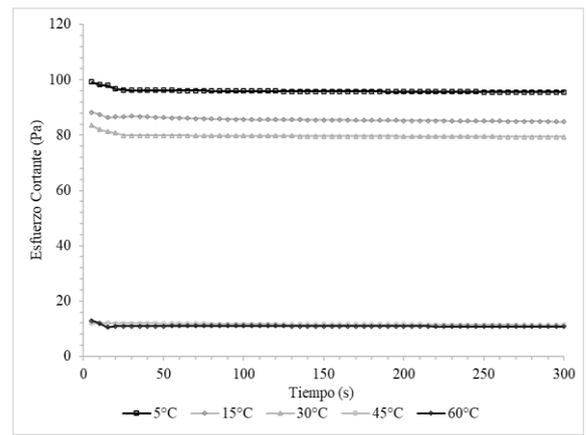
b)



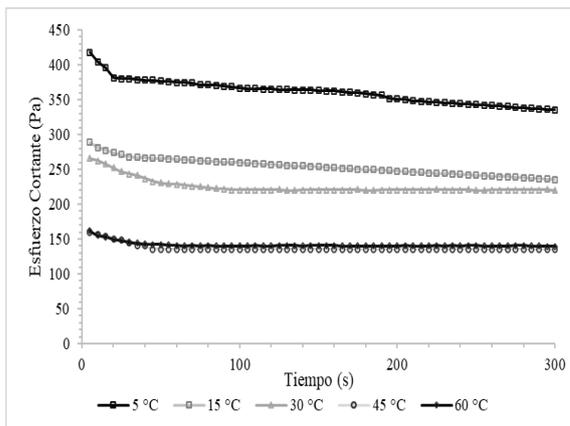
c)



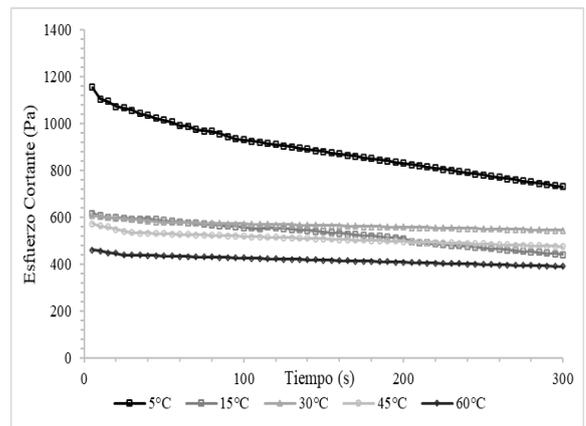
d)



e)



f)



- (a) disolución al 0%
- (b) disolución al 2%
- (c) disolución al 4%
- (d) disolución al 6%
- (e) disolución al 8%
- (f) disolución al 10%

Figura 55. Variación del esfuerzo cortante con el tiempo para el zumo de naranja de 0 a 10 % de fibra a diferentes temperaturas. Modelo Figoni Shoemaker.

5.4.4 Comportamiento al flujo zumo de mandarina con fibra

El comportamiento al flujo del zumo de mandarina con fibra añadida se analizó en el intervalo de temperaturas de 5 a 60 °C. Observando los reogramas se puede determinar que la pendiente de las rectas obtenidas, es decir, la viscosidad, varía considerablemente en función de la temperatura, decreciendo a medida que aumenta esta variable y en función de la fibra añadida, aumentando la viscosidad a medida que aumenta esta variable. Observando también los reogramas de estos experimentos (Figuras 56-61) se observa cómo al superar un 4% a 30 °C de contenido de fibra, los reogramas no se ajustan a una recta que pasa por el origen de coordenadas, sino que más bien se parecen a un fluido pseudoplástico o de Herschel-Bulkley. Este comportamiento, que no se ha observado en las dos primeras concentraciones, se debe al contenido de la fibra añadida a estas muestras. En otras palabras, el zumo de mandarina con fibra pierde su comportamiento newtoniano a medida que aumenta el concentrado de fibra y baja su temperatura.

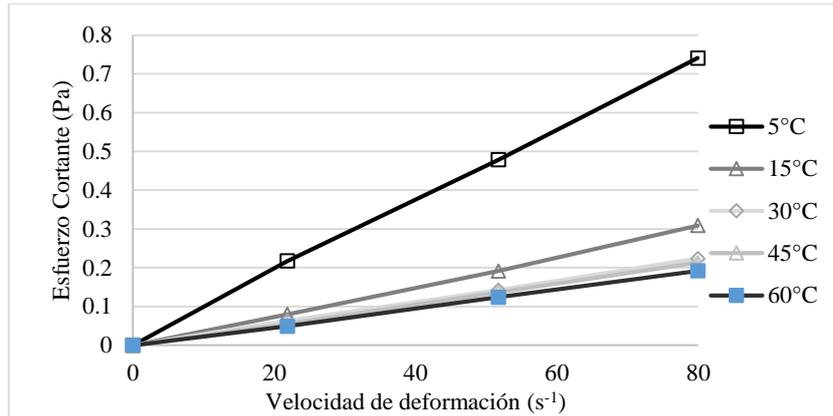


Figura 56. Reograma para zumo de mandarina a concentración de 0% de fibra a todas las temperaturas.

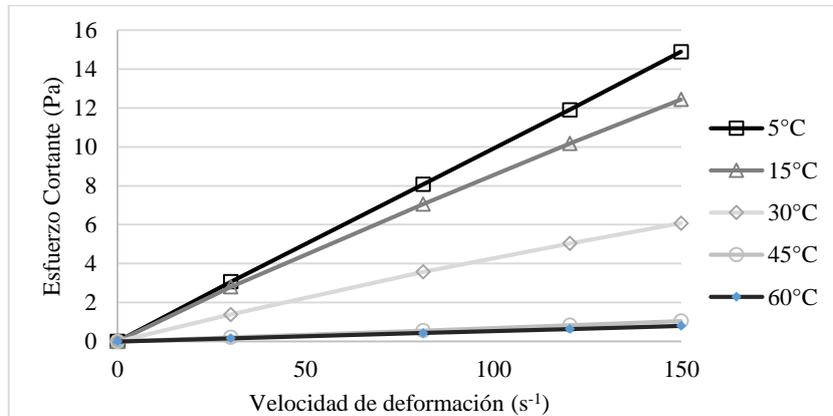


Figura 57. Reograma para zumo de mandarina a concentración de 2% de fibra a todas las temperaturas.

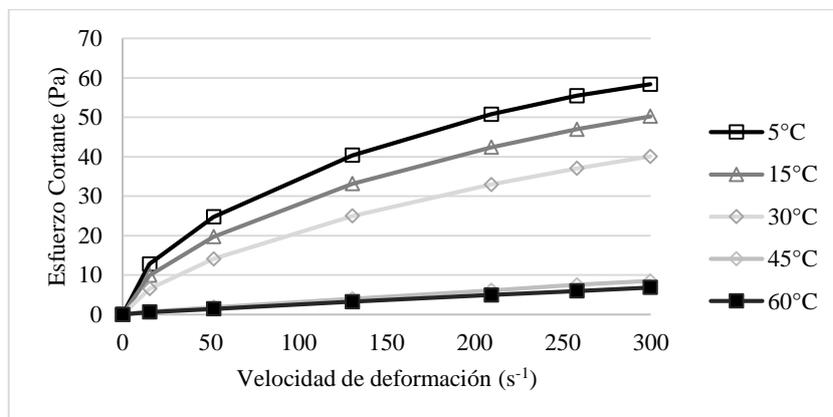


Figura 58. Reograma para zumo de mandarina a concentración de 4% de fibra a todas las temperaturas.

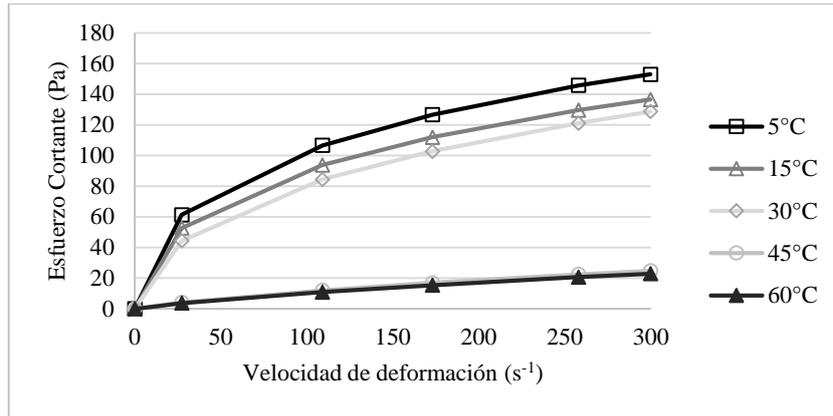


Figura 59. Reograma para zumo de mandarina a concentración de 6% de fibra a todas las temperaturas.

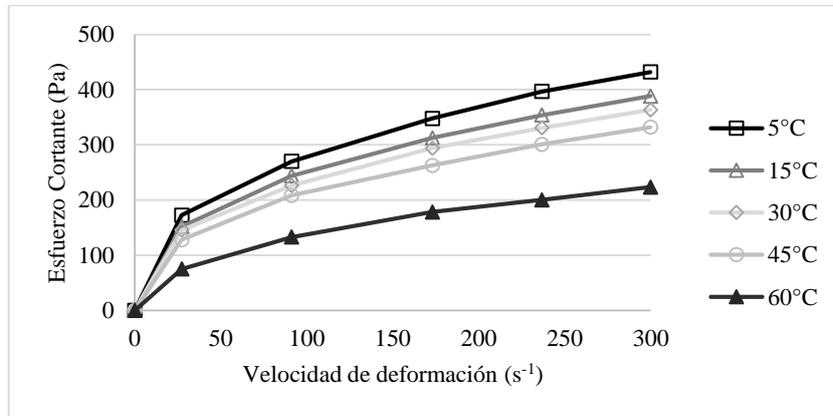


Figura 60. Reograma para zumo de mandarina a concentración de 8% de fibra a todas las temperaturas.

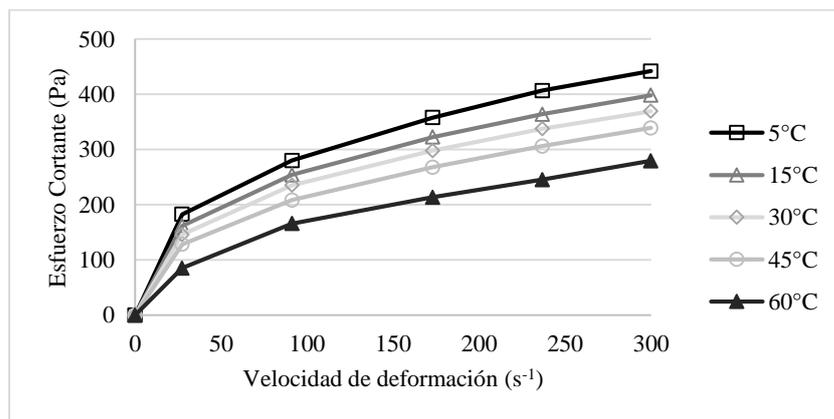


Figura 61. Reograma para zumo de mandarina a concentración de 10% de fibra a todas las temperaturas.

El cálculo de los parámetros reológicos esfuerzo umbral (σ_0), índice de consistencia (k) e índice de comportamiento al flujo (n) para el zumo de mandarina se realizó mediante una regresión no lineal donde se obtienen los valores de pendiente e intercepto de la ecuación, mismos que corresponden al índice de comportamiento de flujo (n), índice de consistencia (k) y umbral de fluencia (σ_0) respectivamente.

El parámetro índice de comportamiento al flujo indica el grado de desviación con relación al comportamiento newtoniano que presentan los fluidos, cuando es menor que la unidad, 1, el fluido es no newtoniano. El índice de consistencia k expresado en (Pa.sⁿ), indica cómo se interrelacionan los compuestos en el producto. Por último, el esfuerzo umbral indica el esfuerzo requerido para iniciar el flujo o esfuerzo de fluencia, dependiendo precisamente de la composición, distribución y características de las partículas suspendidas en la muestra.

Tabla 22. Valores para los parámetros del modelo Herschel-Bulkley ($0.1 \text{ s}^{-1} < \dot{\gamma} < 300 \text{ s}^{-1}$, con promedio de tres replicas \pm desviación standard).

Fibra (%)	T (°C)	σ_0 (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n	R^2	Comportamiento Reológico
0	60	0,000±0,000	0,002±0,0010	1,000±0,000	0,9966	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,002±0,0002	1,000±0,000	0,9967	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,003±0,0011	1,000±0,000	0,9957	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,004±0,0009	1,000±0,000	0,9971	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,009±0,0008	1,000±0,000	0,9973	Newtoniano
2	60	0,000±0,000	0,005±0,0008	1,000±0,000	0,9997	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,006±0,0010	1,000±0,000	0,9995	Newtoniano
	30	0,000±0,000	0,052±0,0011	1,000±0,000	0,9995	Newtoniano
	15	0,000±0,000	0,095±0,0241	1,000±0,000	0,9992	Newtoniano
	5	0,000±0,000	0,133±0,0325	1,000±0,000	0,9973	Newtoniano
4	60	0,000±0,000	0,034±0,0074	1,000±0,000	0,9994	Newtoniano
	45	0,000±0,000	0,044±0,0025	1,000±0,000	0,9996	Newtoniano
	30	0,092±0,009	1,329±0,0352	0,621±0,017	0,9989	Ley Potencia
	15	0,113±0,012	2,251±0,7456	0,545±0,007	0,9994	Ley Potencia

	5	0,506±0,032	3,403±0,9657	0,508±0,018	0,9987	Ley Potencia
	60	0,460±0,052	0,362±0,0471	0,785±0,010	0,9267	Ley Potencia
6	45	0,738±0,266	0,568±0,0111	0,733±0,025	0,9995	Ley Potencia
	30	1,157±0,032	11,13±1,1361	0,435±0,036	0,9998	Herschel-Bulkley
	15	1,204±0,016	15,04±2,6574	0,389±0,087	0,9955	Herschel-Bulkley
	5	1,287±0,014	18,26±1,2173	0,376±0,030	0,9998	Herschel-Bulkley
	60	1,233±0,851	17,37±6,01	0,448±0,074	0,9946	Herschel-Bulkley
8	45	1,202±0,854	34,69±11,24	0,391±0,113	0,9996	Herschel-Bulkley
	30	1,423±0,741	39,69±12,74	0,372±0,087	0,9996	Herschel-Bulkley
	15	1,643±0,868	41,70±16,45	0,375±0,081	0,9996	Herschel-Bulkley
	5	2,124±0,376	47,45±24,65	0,364±0,060	0,9986	Herschel-Bulkley
	60	2,147±0,654	22,19±11,17	0,439±0,111	0,9946	Herschel-Bulkley
10	45	2,651±0,554	33,14±10,24	0,390±0,154	0,9996	Herschel-Bulkley
	30	3,114±0,642	41,73±13,32	0,362±0,127	0,9996	Herschel-Bulkley
	15	3,904±1,012	46,14±13,02	0,361±0,117	0,9996	Herschel-Bulkley
	5	4,578±1,214	52,13±18,33	0,354±0,121	0,9986	Herschel-Bulkley

El comportamiento reológico de los zumos de manzana con fibra en sus concentraciones (0 – 10%) se describieron con el modelo Herschel-Bulkley ya que los coeficientes de correlación obtenidos para las muestras fueron mejores que los correspondientes a otros modelos.

La pseudo-plasticidad del zumo se puede medir por el índice de comportamiento al flujo (n), el cual decrece cuando la pseudo-plasticidad aumenta. En la Tabla 22, se observa que las muestras de zumo de mandarina en donde se presentó un comportamiento pseudo-plástico, el índice de comportamiento al flujo disminuyó al aumentar la concentración de fibra. El índice de comportamiento al flujo también es dependiente de la temperatura, ya que los valores de n disminuyen a medida que decrece la temperatura. Para el caso del parámetro esfuerzo de fluencia σ_0 , el cual representa la magnitud de la plasticidad y la resistencia en el que el zumo de mandarina se opone a deformarse de forma permanente, este disminuye al aumentar la temperatura en cada una de las muestras y si se toma en cuenta una temperatura específica el esfuerzo de fluencia aumenta con el porcentaje de concentración de fibra.

En la Tabla 22, tal como era de esperar, el índice de consistencia (k) o la viscosidad del zumo de mandarina aumenta con el contenido de fibra y con la disminución de la temperatura. De este modo el valor de la viscosidad varía entre 0,002-0,010 Pa·s (0% Cf, 60 °C) a un valor de 22,19-52,13 Pa·s (10% Cf, 5°C). La adición de fibra en el zumo de mandarina no implicó necesariamente un cambio de comportamiento de newtoniano a no newtoniano, sin embargo, al superar el valor límite de concentración de 4% Cf a 30°C el zumo cambia su comportamiento de un fluido newtoniano a un fluido pseudo-plástico. Todos estos parámetros indican que la variabilidad en el comportamiento reológico está relacionada con la alteración estructural que provoca el cizallamiento. Comportamientos similares han sido encontrados en zumos de mandarina a temperaturas de -12 a 6°C y en mermeladas de albaricoque y escaramujo (Falguera *et al.*, 2010; Villarán *et al.*, 1997).

5.4.5 Efecto de la temperatura sobre el comportamiento al flujo

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad, descrito anteriormente, ha sido cuantificado mediante una ecuación de tipo Arrhenius. Para cada concentración de fibra se han empleado las viscosidades a las diferentes temperaturas de ensayo, en la Tabla 23 se muestran los valores obtenidos para los parámetros de la ecuación de Arrhenius. Se observa que el factor de frecuencia (k_0) presenta valores bajos y aumenta con el aumento de la concentración en fibra. Para la energía de activación (E_a) se observan valores con tendencias similares, sin embargo, se puede observar un incremento considerable de la E_a , a partir del 2% de contenido de fibra, lo que indica que la viscosidad está influenciada por la temperatura a concentraciones elevadas de fibra. Los valores de energía de activación obtenidos para el zumo de mandarina variaron de 20,13 (kJ/mol) para la concentración de 0% de fibra a 72,50 (kJ/mol), para la concentración de 4%. Valores similares se han obtenido en estudios previos para zumo de melocotón con fibra añadida, en la

investigación de Augusto *et al.*, (2011), adicionalmente, reportando intervalo de fibra de 10% a 12%, obteniendo un rango de valores entre 11,28-69,00 kJ/mol.

Tabla 23. Parámetros de la ecuación Arrhenius Zumo de Mandarina

Fibra (%)	E_a (kJ/mol)	k_0 (mPas.sⁿ)	R^2
0	20,13	0,0011	0,8693
2	51,39	4,161E-08	0,8721
4	72,50	1,334E-10	0,8786
6	61,32	9,513E-08	0,8554
8	11,93	2,990E+02	0,9661
10	11,15	4,476E+02	0,9126

5.4.6 Efecto de la concentración sobre el comportamiento al flujo

El efecto de la concentración en el comportamiento reológico del zumo de mandarina se puede describir por un modelo potencial (ecuación 9) y/o por un modelo exponencial (ecuación 8) (Saravacos, 1970). El mejor ajuste se ha obtenido con el modelo exponencial, ya que presenta valores de coeficientes de determinación más elevados. De este modo, para este estudio, únicamente se presentan los ajustes a este modelo. Estos resultados también fueron establecidos por Ibarz *et al.*, (1992), donde el modelo exponencial es el mejor que se adecúa en los zumos de frutas. En la Tabla 24, se presentan los parámetros obtenidos en estos ajustes, para las diferentes temperaturas estudiadas, así como los valores de los respectivos coeficientes de determinación obtenidos. En todos los casos los ajustes y los estimados de los parámetros son significativos con un nivel de probabilidad del 95%.

Tabla 24. Influencia del contenido de fibra en la consistencia (índice de consistencia o viscosidad) a cada temperatura. $k = a_1 \exp(b_1 C)$

Temperatura (°C)	a_1 (mPa*s ⁿ)	b_1 (% ⁻¹)	R^2
5	81,5	0,7585	0,8557
15	58,4	0,7413	0,8691
30	3,2	1,0059	0,8622
45	0,6	1,0181	0,9451
60	0,5	1,0012	0,9559

Se puede observar en la Tabla 24, que el comportamiento de la constante a_1 sigue una tendencia clara al aumentar la temperatura, al igual que el estudio realizado por Ibarz *et al.*, (1992) con zumo de melocotón clarificado, en donde se observa una disminución de estos valores a temperaturas más altas. En cuanto al parámetro b_1 , se puede observar que este no sigue una tendencia clara al aumentar la temperatura, estos valores difieren de los obtenidos en los trabajos con zumo de melocotón por Ibarz *et al.*, (1992), en donde este parámetro disminuye a medida aumenta la temperatura.

5.4.7 Compensación Cinética

Los parámetros de la ecuación de Arrhenius de la Tabla 23, se utilizaron para elaborar la Figura 62, en donde se muestra la dependencia de $\ln k_0$ y la energía de activación al flujo (E_a) cuando el contenido de fibra aumenta, mostrando una línea recta, para los parámetros obtenidos del modelo de Newton, ley de la potencia y los modelos Herschel-Bulkely. En este caso en particular, se concluyó la existencia de una compensación en la consistencia del zumo de mandarina para diferentes contenidos de fibra.

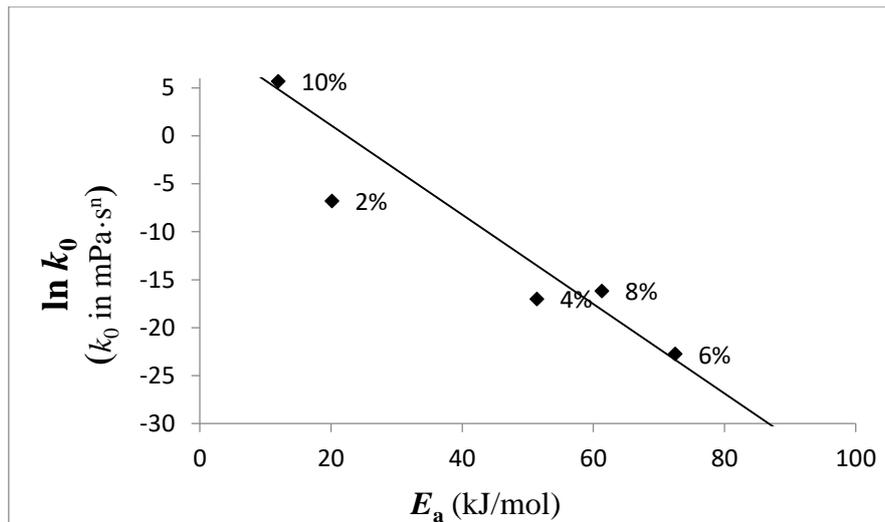


Figura 62. Compensación cinética zumo de mandarina con fibra añadida

La existencia de la línea recta indica que la variable ambiental, en este caso el contenido de fibra, no cambia el mecanismo de flujo para todo el intervalo de valores del contenido de fibra.

Los datos de la Tabla 21. Se ajustaron a la Ecuación 17, la Tabla 25, muestra las estimaciones y los intervalos de confianza.

Tabla 25. Parámetros de la compensación cinética

		2-10% Cf
Tiso (°C)	Valor	-14,01
	Intervalo de confianza	-138,8 a 102,9
$\ln(k_{T_{iso}})$	Valor	10,42
	Intervalo de confianza	9,04 a 11,45
R^2		0,901

La Figura 63 muestra el hecho de que, según la teoría de la compensación, para la temperatura de iso-consistencia el valor del coeficiente de consistencia o la viscosidad sería el mismo para cualquier contenido en fibra. Esta figura muestra como el logaritmo

neperiano de la viscosidad expresada en mPa·s se aproxima al mismo valor 10,42 a la temperatura de -14.01 para cada una de las muestras de zumo de mandarina con contenido de fibra de 2% a 10%.

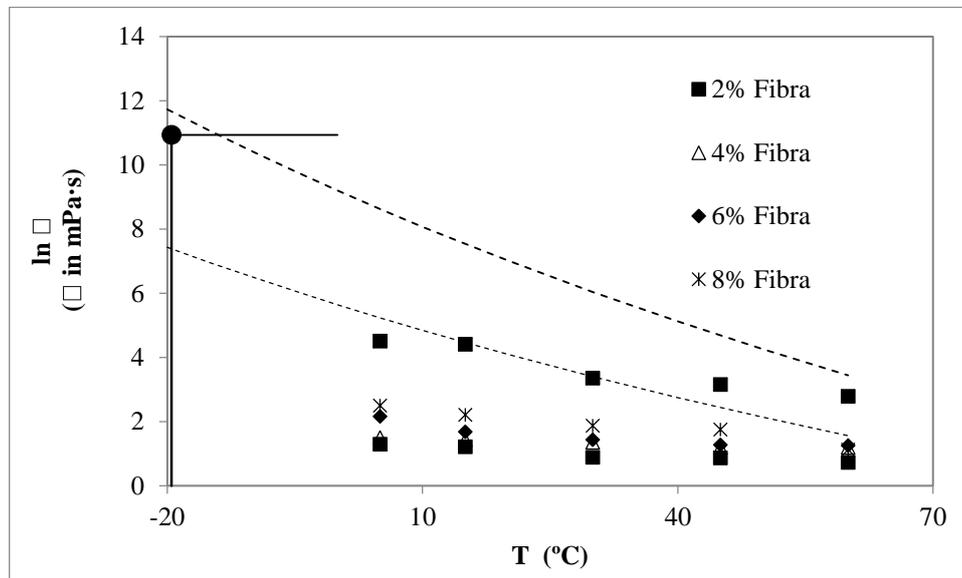


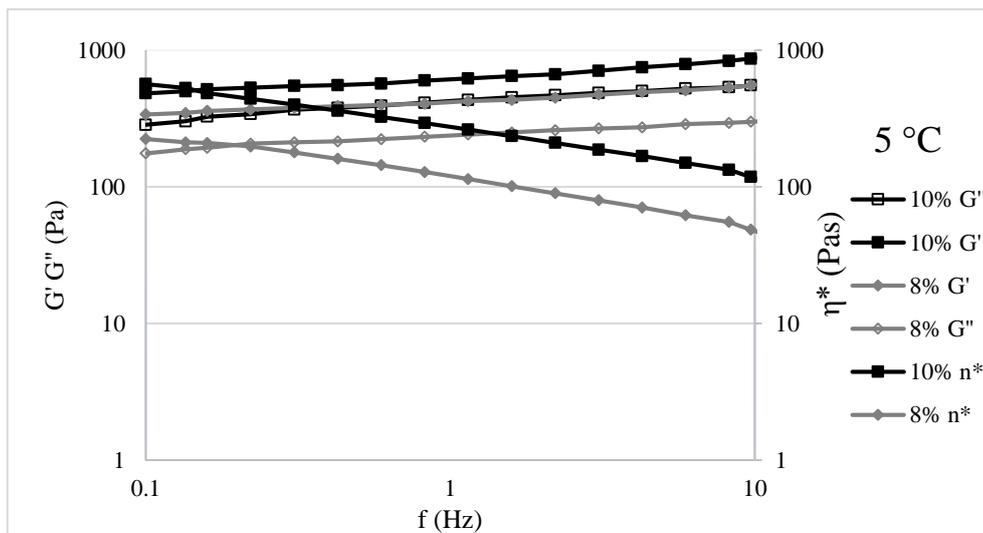
Figura 63. Tendencia de la viscosidad al punto de iso-consistencia para todos los contenidos de fibra

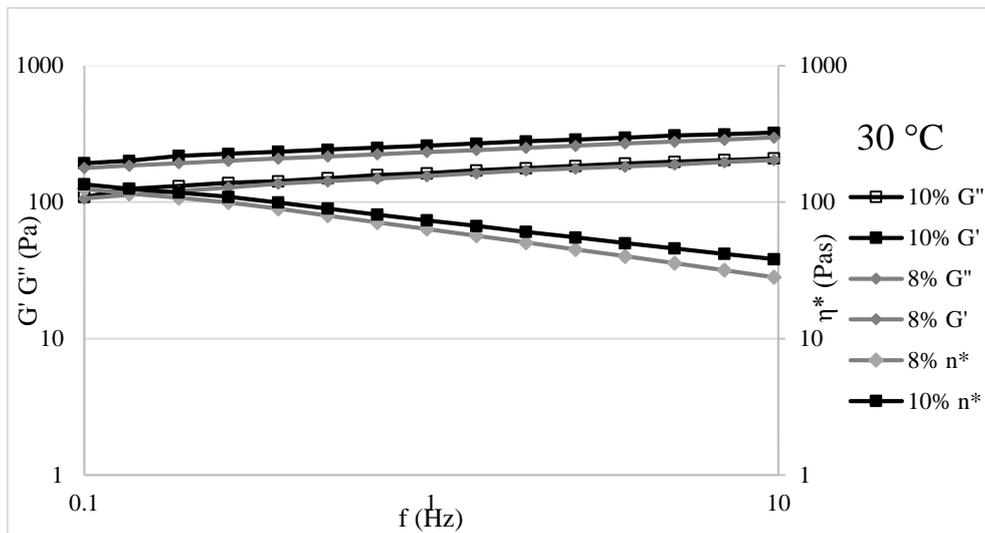
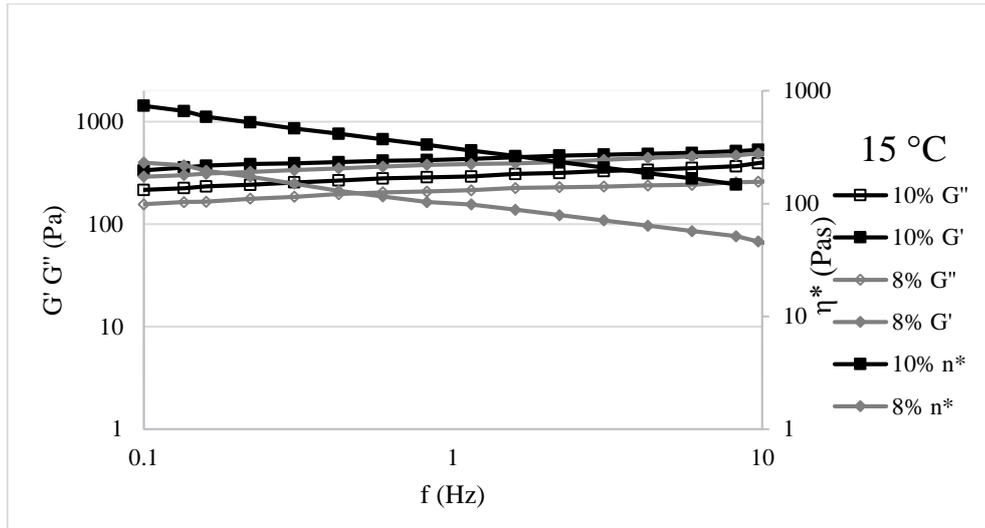
Esta temperatura a la cual la viscosidad o los valores del coeficiente de consistencia son los mismos independientemente del contenido de fibra se la denomina temperatura de iso-consistencia. Para este caso en particular, no es posible comprobar experimentalmente, ya que la temperatura de iso-consistencia en este caso es de -14,01°C, el zumo de mandarina estaría congelado y sin fluidez.

5.4.8 Caracterización de la viscoelasticidad del zumo de mandarina con fibra añadida

Los resultados de los ensayos reológicos experimentales oscilatorios se expresan en término del módulo de almacenamiento (G') y del módulo de pérdida (G''). Las

mediciones de barrido de frecuencia bajo las condiciones de la respuesta viscoelástica lineal se realizaron en el rango de 0,01-10,00 Hz a esfuerzo cortante constante de 1,00 Pa. Los módulos de almacenamiento (G'), los módulos de pérdida (G'') y la viscosidad compleja (η^*) se muestran en la Figura 64, en función de la frecuencia para todos los estudios de temperatura con 8% y 10% de fibra. En todos los experimentos, el valor de G' fue mayor que los valores de G'' a la frecuencia empleada, reportando un comportamiento de gel débil. Este comportamiento ha sido reportado por otros autores en productos con características de consistencia similares; tomate, almidón de maíz y jugo de durazno con fibra agregada (Rao y Cooley 1992; Hirashima *et al.*, 2005, Ahmed y Ramaswamy 2006 y Augusto *et al.*, 2011).





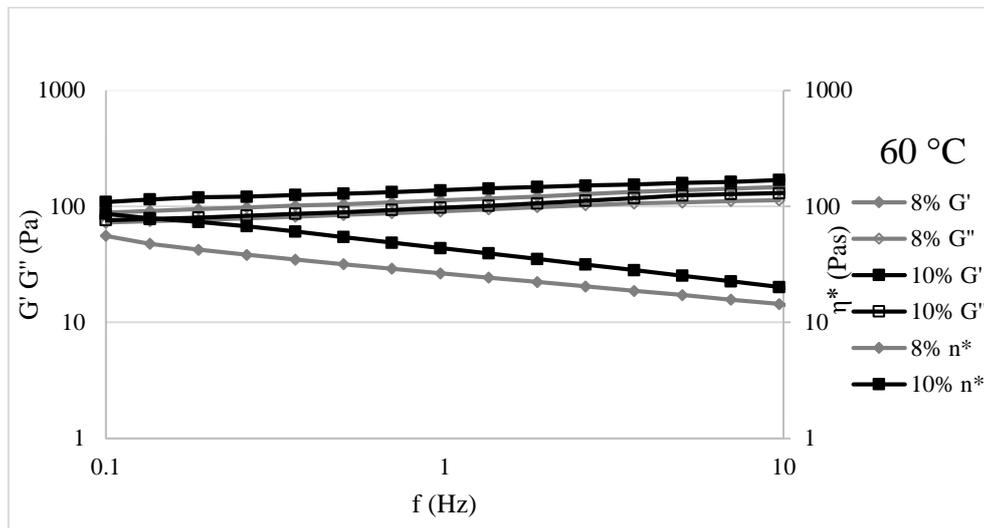
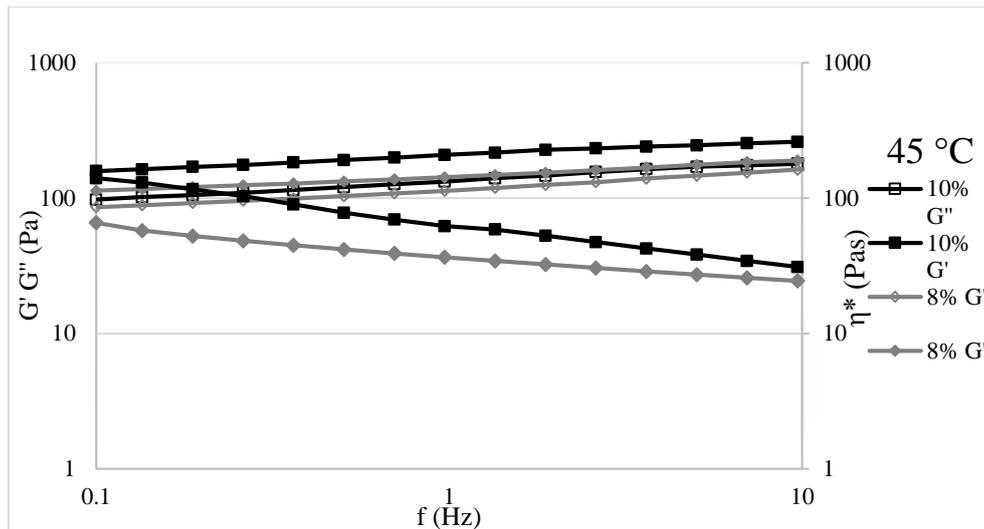


Figura 64. G' G'' viscosidad compleja obtenida del barrido de frecuencia (0,01 a 10 Hz) para un esfuerzo cortante de 1 Pa. 10% y 16% contenido de fibra a 5 °C, 15 °C, 30 °C, 45 °C y 60 °C.

La muestra con 10% de fibra exhibió una mayor elasticidad con una mayor magnitud de G' en comparación con la G' de la muestra al 8%. Para representar las características viscoelásticas del jugo de mandarina con fibra agregada se utilizó un modelo matemático. Una ecuación de tipo potencial se utilizó para ajustar los datos

viscoelásticos dinámicos. Las regresiones lineales del parámetro $\ln G'$ y G'' versus $\ln(\omega)$ se llevaron a cabo a cada temperatura y la magnitud de la pendiente y la intersección se analizaron con las ecuaciones 14 y 15. Los parámetros de k' , n' , k'' , n'' , con el coeficiente de regresión relacionado con G' , G'' y ω . Las regresiones de la ecuación para ambas concentraciones de fibra a diferentes temperaturas se muestran en la Tabla 26. Las muestras 8% y 10% se ajustaron con un $R^2 > 0,89$. Se mostró que la muestra de jugo de mandarina con un 10% de fibra agregada en el intervalo de temperatura exhibió un comportamiento más sólido con una mayor magnitud de k' (316,22-90,5 Pa·sⁿ) que k'' (229,10-59,90 Pa·sⁿ). Se observó el mismo comportamiento para la muestra de jugo de mandarina con 8% de fibra agregada que exhibió un valor de k' (257,04-74,13 Pa·sⁿ) mayor que k'' (140,92-59,88 Pa·sⁿ). Para los valores de n' y n'' , la muestra de jugo de mandarina con 10% de fibra agregada mostró un valor en el intervalo de 0,24-0,19 y 0,25-0,22 respectivamente y para la muestra de 8% los valores de fibra agregada variaron entre 0,20-0,19 y 0,21-0,20, que muestra que el valor de n' y n'' disminuye, confirmando que las temperaturas representan una variable importante para el comportamiento viscoso.

Un comportamiento similar de los parámetros k' , n' , k'' , n'' en términos de influencia de la temperatura se observa en un estudio de zumo de durazno con fibra adicional de Augusto *et al.* (2011). Ahmed y Ramaswamy (2006) han estudiado las propiedades viscoelásticas de los alimentos para bebés, los valores de k' y k'' variaron entre 384,0- 39,6 (Pa·sⁿ) y 351,0-13,0 (Pa·sⁿ), respectivamente. Los valores de n' y n'' variaron entre 0,5-0,15 y 0,10-0,26, respectivamente. Bayod *et al.* (2008), evaluaron el comportamiento viscoelástico de la salsa de ketchup a temperatura ambiente. Los valores de k' y k'' 633,8-735,5 (Pa·sⁿ) y 159,5-106,6 (Pa·sⁿ), respectivamente y n' y n'' variaron entre 0,10-0,11 y 0,31-0,33.

En términos de temperatura, los módulos de almacenamiento y de pérdida demostraron una dependencia con la temperatura, disminuyendo ambos parámetros al tiempo que aumenta la temperatura. Comportamientos similares también se han observado en comida para bebés, pulpa de fruta jaboticaba y zumo de durazno con fibra agregada (Ahmed & Ramaswamy 2007, Sato & Cunha 2007, Augusto *et al.*, 2011).

Tabla 26. Parámetros de la ley de potencia para la correlación entre los módulos de almacenamiento y pérdida (G' y G''), en función de la frecuencia oscilatoria (ω) (1 pa, media de tres repeticiones \pm desviación estándar).

T (°C)	8% fibra				10% fibra			
	G'		G''		G'		G''	
	k' (Pa·s ^{n'})	n'	k'' (Pa·s ^{n''})	n''	k' (Pa·s ^{n'})	n'	k'' (Pa·s ^{n''})	n''
5	257,04±48,58	0,20±0,01	140,91±22,05	0,21±0,02	316,22±45,00	0,24±0,01	229,12±43,55	0,25±0,05
15	245,47±14,23	0,21±0,01	137,41±12,74	0,21±0,02	269,15±32,47	0,21±0,02	158,52±12,70	0,24±0,03
30	154,88±10,66	0,20±0,02	100,00±16,21	0,21±0,02	158,35±14,52	0,20±0,01	107,15±11,10	0,23±0,02
45	97,83±8,57	0,20±0,01	70,78±2,23	0,21±0,03	144,54±12,99	0,19±0,03	85,11±10,70	0,23±0,05
60	74,13±3,16	0,19±0,03	63,12±1,47	0,20±0,03	90,53±28,79	0,19±0,03	59,88±14,40	0,22±0,04

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Los zumos de frutas a 12,5° Brix con fibra añadida estudiados en esta investigación, mostraron comportamientos tixotrópicos una vez alcanzaban cierto porcentaje de fibra. Para el caso de los zumos de manzana, limón y naranja, estos mostraron tixotropía para los contenidos de fibra superiores al 10%, para el caso del zumo de mandarina se observó un carácter tixotrópico cuando la muestra superó el 6% de fibra a temperaturas menores de 30°C. La tixotropía se ha podido cuantificar utilizando el modelo Figoni-Shoemaker. La disminución de la temperatura y el aumento del contenido de fibra provocó un aumento en todos los parámetros relacionados con la estructura interna: esfuerzo cortante inicial (σ_0), el esfuerzo cortante del equilibrio (σ_e) y diferencia ($\sigma_0 - \sigma_e$). Adicionalmente, el valor de la constante cinética de destrucción estructural (k), incrementa cuando la temperatura aumenta y disminuye a medida aumenta el contenido de fibra.

En el estudio del comportamiento al flujo, para el caso del zumo de manzana se observó que el zumo siguió el flujo del modelo Newtoniano, Ley de la Potencia y Herschel-Bulkley para los contenidos de fibra de 0 a 8%, de 10 a 12% y 16%, respectivamente. El zumo de limón siguió un flujo del modelo de Newton para los contenidos de 0-12%, un flujo pseudo-plástico a partir de la concentración de 14% a temperaturas menores de 30°C, y un flujo Herschel-Bulkley a partir de la concentración de 20% a temperaturas menores de 45°C. El zumo de naranja siguió un flujo del modelo de Newton para los contenidos de 0-8%, un fluido Ley de la potencia para las concentraciones de 10 a 16% contenido de fibra, y un flujo Herschel-Bulkley a partir de la concentración de 18%. El zumo de mandarina siguió el flujo del modelo Newtoniano para la concentración de 0-4% (45°C), un flujo pseudo-plástico a partir de la concentración de 4% para las temperaturas menores de 30°C y un flujo Herschel-Bulkley para las concentraciones por encima de 6% a partir de las temperaturas de 30°C.

Para todos los casos, la viscosidad o el coeficiente de consistencia aumentó con la disminución de la temperatura disminuyó y el aumento en el contenido de fibra. La desviación del flujo newtoniano aumentó con la adición de fibra, no solo representada por el cambio de modelo, sino también por la disminución del índice de comportamiento del flujo (n) y el aumento del esfuerzo cortante inicial (σ_0) una vez que apareció. La fibra interactúa con las partículas del zumo para crear nuevos enlaces produciendo nuevas estructuras internas que forman un flujo más complejo.

Se encontró que el efecto de la temperatura puede describirse con la ecuación de Arrhenius, que para el caso del zumo de manzana, limón y naranja se muestran dos líneas de compensación, una para las muestras con un contenido de fibra hasta el 8% (manzana), 16% (limón), 8% (naranja) que siguieron el modelo de Newton, y otro para los zumos que contienen más del 10% (manzana), 18% (limón), 10% (naranja) de fibra que siguieron los modelos no newtonianos y una línea recta para el zumo de mandarina de 2 a 10% contenido de fibra. Se encontró que la temperatura de iso-consistencia era 78,91°C y -135.9°C, -51.0°C y -151.6°C, 373.6°C y -58.4°C para el comportamiento newtoniano y no newtonianos, respectivamente para los zumos de manzana, limón y naranja y -14.0°C para el zumo de mandarina. Se encontró que la compensación para los zumos no newtonianos era real, concluyendo que el contenido de fibra influyó significativamente en el coeficiente de consistencia y eso no cambió el mecanismo de flujo para este intervalo de valores (10-16% manzana y naranja, 16-22% limón), cuyo control fue entrópico a las temperaturas de trabajo. También se encontraron dos ecuaciones generales para describir la dependencia combinada de la temperatura y el contenido de fibra en la viscosidad o en el índice de consistencia.

Las propiedades viscoelásticas de un zumo de manzana (14 y 16%), limón (18, 20, 22%), naranja (16 y 18%) y mandarina (8 y 10%) de fibra añadida se evaluaron a partir de

mediciones dinámicas a temperaturas de 5, 15, 30, 45 y 60 °C. Todos los zumos con fibra agregada estudiados en todos los porcentajes citados exhibieron un comportamiento viscoelástico, mostrando una G' mayor que G'' en todos los valores de frecuencia (ω). La adición de fibra influyó en las propiedades viscoelásticas y aumentó la solidez del zumo de fruta, mostrando que a medida que aumenta el porcentaje de fibra, aumentan los valores de G' y G'' . La temperatura tuvo un efecto significativo en las propiedades reológicas dinámicas de todas muestras, disminuyendo las magnitudes de G' y G'' a medida que aumentaba la temperatura para todos los casos. La variación de G' y G'' con la frecuencia oscilatoria fue bien descrita por una función tipo potencial.

La información obtenida es útil para futuros estudios sobre diseño de procesos ya que la adición de fibra da como resultado un producto más consistente y en un comportamiento diferente durante la elaboración.

6 Referencias

A

- AACC Dietary Fiber Definition Committee: Definition of dietary fiber: Report of the Dietary Fiber Definition Committee to the Board of Directors of the American Association of Cereal Chemists. *Cereal Foods World* 2001, 46:112–126
- Abdul-Hamid, A., y Luan, Y. S. (2000). Functional properties of dietary fibre prepared from defatted rice bran. *Food Chemistry*, 68(1), 15-19
- Ahmed, J., y Ramaswamy, H. S. (2006). Viscoelastic and thermal characteristics of vegetable puree-based baby foods. *Journal of Food Process Engineering*, 29(3), 219-233
- AIJN (Association of the Industry of Juices and Nectars from Fruits and Vegetables of the European Union) (2016). Code of Practice for Evaluation of Fruit and Vegetables Juices
- Alonso, M., Larrode, O., y Zapico, J. (1995). Rheological behaviour of infant foods. *Journal of Texture Studies*, 26(2), 193-202
- Alvarez, M. D., y Canet, W. (2013). Time-independent and time-dependent rheological characterization of vegetable-based infant purees. *Journal of Food Engineering*, 114(4), 449-464
- Alvarez, M. D., Fernández, C., y Canet, W. (2004). Rheological behaviour of fresh and frozen potato puree in steady and dynamic shear at different temperatures. *European Food Research and Technology*, 218(6), 544-553

Anantheswaran, R. C., y Rao, M. (1985). Heat transfer to model non-newtonian liquid foods in cans during end-over-end rotation. *Journal of Food Engineering*, 4(1), 21-35

Alvarez, M. D., Canet, W., y Fernandez, C. (2007). The effect of temperature, geometry, gap and surface friction on oscillatory rheological properties of mashed potatoes. *Journal of Food Process Engineering*, 30(3), 267-292

Álvarez, E. E., y Sánchez, P. G. (2006). La fibra dietética. *Nutrición Hospitalaria*, 21(2), 61-72

Anderson, J., y Bridges, S. (1988). Dietary fiber content of selected foods. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 47(3), 440-447

Anita FP, y Abraham P (1997) *Clinical Dietetics and Nutrition*. Delhi Oxford University Press, Calcutta, 73–77

Aspinall, G. (1982). Analysis of polysaccharides. *Lineback, DR, y Inglett, GE, AVI Publishing Co., Westport*, 125

Augusto, P. E., Falguera, V., Cristianini, M., y Ibarz, A. (2011). Influence of fibre addition on the rheological properties of peach juice. *International Journal of Food Science & Technology*, 46(5), 1086-1092

B

Barbosa-Cánovas, G. V., Kokini, J. L., Ma, L., y Ibarz, A. (1996). The rheology of semiliquid foods. *Advances in Food and Nutrition Research*, 1-69

- Barbosa-Cánovas, G., Ibarz, A., y Peleg, M. (1993). Propiedades reológicas de alimentos fluidos: Revisión. *Alimentaria*, (241), 39-89
- Basu, S., Shivhare, U., y Raghavan, G. (2007). Time dependent rheological characteristics of pineapple jam. *International Journal of Food Engineering*, 3(3)
- Bayindirli, L., Özilgen, M., y Ungan, S. (1993). Mathematical analysis of freeze concentration of apple juice. *Journal of Food Engineering*, 19(1), 95-107
- Bayod, E., Willers, E. P., y Tornberg, E. (2008). Rheological and structural characterization of tomato paste and its influence on the quality of ketchup. *LWT-Food Science and Technology*, 41(7), 1289-1300
- Borwankar, R., Frye, L., Blaurock, A., y Sasevich, F. (1992). Rheological characterization of melting of margarines and tablespreads. *Rheology of Foods*, 55-74.
- Borderías, A. J., Sánchez-Alonso, I., y Pérez-Mateos, M. (2005). New applications of fibres in foods: Addition to fishery products. *Trends in Food Science & Technology*, 16(10), 458-465
- Bozkurt, H., y Icier, F. (2009). Rheological characteristics of quince nectar during ohmic heating. *International Journal of Food Properties*, 12(4), 844-859
- Brennan, E., Setser, C., y Schmidt, K. (2002). Yogurt thickness: Effects on flavor perception and liking. *Journal of Food Science*, 67(7), 2785-2789

C

- Canet, W., Álvarez, M. D., Fernández, C., y Luna, P. (2005). Comparisons of methods for measuring yield stresses in potato puree: Effect of temperature and freezing. *Journal of Food Engineering*, 68(2), 143-153
- Catignani, G. L., y Carter, M. E. (1982). Antioxidant properties of lignin. *Journal of Food Science*, 47(5), 1745-1745
- Cepeda, E., y Villaran, M. (1999). Density and viscosity of malus floribunda juice as a function of concentration and temperature. *Journal of Food Engineering*, 41(2), 103-107
- Cepeda, E., Villarán, M., y Ibarz, A. (1999). Rheological properties of cloudy and clarified juice of malus floribunda as a function of concentration and temperature. *Journal of Texture Studies*, 30(5), 481-491
- Chamorro, R. A. M., y Mamani, E. C. (2010). Importancia de la fibra dietética, sus propiedades funcionales en la alimentación humana y en la industria alimentaria. *Revista de investigación en ciencia y tecnología de alimentos*, 1(1)
- Chawla, R., y Patil, G. (2010). Soluble dietary fiber. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(2), 178-196
- Cho, S. S. (Ed.). (2001). *Handbook of dietary fiber* (Vol. 113). CRC Press.
- Cho, S. S., y Prosky, L. (1999). Application of complex carbohydrates to food product fat mimetics. *Food Science and Technology-New York-Marcel Dekker*, 411-430

Codex STAN (2005). *Codex General Standard for Fruit Juices and Nectars*.

http://www.fao.org/input/download/standards/10154/CXS_247e.pdf

Constable, F. H. (1925). The mechanism of catalytic decomposition. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 108(746), 355-378

Crandall, P., Davis, K., y Baker, R. (1990). Viscosity reduction of orange juice concentrate by pulp reduction vs enzyme treatment. *Food Technology*, 44(4), 126-129

Cummings, J. H., Edmond, L. M., y Magee, E. A. (2004). Dietary carbohydrates and health: Do we still need the fibre concept? *Clinical Nutrition Supplements*, 1(2), 5-17

D

Desmedt, A. y Jacobs, H. (2001). Soluble fibre. In *Guide to functional food ingredients*. Surrey, England: Food RA Leatherhead Publishing, 112–140

Dhingra, D., Michael, M., Rajput, H., y Patil, R. (2012). Dietary fibre in foods: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 49(3), 255-266

Diamante, L., y Umemoto, M. (2015). Rheological properties of fruits and vegetables: A review. *International Journal of Food Properties*, 18(6), 1191-1210

Dietary fiber. The Institute of Food Science and Technology (2007). Public affairs and technical and legislative committees. IFST, 1 - 10.

E

Eastwood, M. A., y Morris, E. R. (1992). Physical properties of dietary fiber that influence physiological function: A model for polymers along the gastrointestinal tract. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 55(2), 436-442

Elleuch, M., Bedigian, D., Roiseux, O., Besbes, S., Blecker, C., y Attia, H. (2011). Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review. *Food Chemistry*, 124(2), 411-421

Endress, H., y Fischer, J. (2008). 26 fibres and fibre blends for individual needs: A physiological and technological approach. *Advanced Dietary Fibre Technology*, 283.

F

Falguera, V., y Ibarz, A. (2010). A new model to describe flow behaviour of concentrated orange juice. *Food Biophysics*, 5(2), 114-119.

Falguera, V., Vélez-Ruiz, J. F., Alins, V., y Ibarz, A. (2010). Rheological behaviour of concentrated mandarin juice at low temperatures. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(10), 2194-2200

Figoni, P. I., y Shoemaker, C. F. (1981). Characterization of structure breakdown of foods from their flow properties. *Journal of Texture Studies*, 12(3), 287-305

G

García Peris, P., y Velasco Gimeno, C. (2007). Evolución en el conocimiento de la fibra. *Nutrición Hospitalaria*, 22, 20-25.

Garvín, A., Ibarz, R., y Ibarz, A. (2017). Kinetic and thermodynamic compensation. A current and practical review for foods. *Food Research International*, 96, 132-153.

Giner, J., Ibarz, A., Garza, S., & Xhian-Quan, S. (1996). Rheology of clarified cherry juices. *Journal of Food Engineering*, 30(1-2), 147-154.

Grigelmo-Miguel, N. G. (1997). *Caracterización de Concentrados de Fibra Dietética de Fruta: Aplicación en la Elaboración de Nuevos Productos*: Tesis Doctoral

Grigelmo-Miguel, N., Ibarz-Ribas, A., y Martín-Belloso, O. (1999). Rheology of peach dietary fibre suspensions. *Journal of Food Engineering*, 39(1), 91-99

Grigelmo-Miguel, N., Ibarz-Ribas, A., y Martín-Belloso, O. (1999). Flow properties of orange dietary fiber suspensions. *Journal of Texture Studies*, 30(3), 245-257

Grigelmo-Miguel, N., y Martín-Belloso, O. (1999). Influence of fruit dietary fibre addition on physical and sensorial properties of strawberry jams. *Journal of Food Engineering*, 41(1), 13-21

Guillon, F., y Champ, M. (2000). Structural and physical properties of dietary fibres, and consequences of processing on human physiology. *Food Research International*, 33(3-4), 233-245

H

Haminiuk, C. W. I., Sierakowski, M., Maciel, G. M., Vidal, José Raniere Mazile Bezerra, Branco, I. G., y Masson, M. L. (2006). Rheological properties of butia pulp. *International Journal of Food Engineering*, 2(1)

Harris, J. (1972). A continuum theory of structural change. *Rheological Acta*, 11(2), 145-151

Hirashima, M., Takahashi, R., y Nishinari, K. (2005). Changes in the viscoelasticity of maize starch pastes by adding sucrose at different stages. *Food Hydrocolloids*, 19(4), 777-784

I

Ibarz, A., Garvin, A., y Costa, J. (1996). Rheological behaviour of sloe (*prunus spinosa*) fruit juices. *Journal of Food Engineering*, 27(4), 423-430

Ibarz, A., Giner, J., Pagan, J., Gimeno, V., y Garza, S. (1995). Rheological behaviour of kiwi fruit juice concentrates. *Journal of Texture Studies*, 26(2), 137-145

Ibarz, A., Gonzalez, C., Esplugas, S., y Vicente, M. (1992). Rheology of clarified fruit juices. I: Peach juices. *Journal of Food Engineering*, 15(1), 49-61

Ibarz, A., y Aguado, M. (1988). Comportamiento reológico del zumo de manzana despectinizado a elevadas concentraciones y bajas temperaturas. *Alimentaria*, 25(189), 65-72.

Ibarz, A., y Lozano, J. (1992). Rheology of concentrated peach and plum pulps. *Revista Española de Ciencia y Tecnología de Alimentos*

Ibarz, A., y Naves, J. (1995). Efecto de la temperatura y contenido en sólidos solubles sobre la cinética de pardeamiento no enzimático de zumos clarificados de manzana/Effect of temperature and soluble solids content on nonenzymatic browning

kinetics for clarified apple juices. *Food Science and Technology International*, 1(1), 29-34

Ibarz, A., Marco, F., y Pagán, J. (1993). Rheology of persimmon juice. *Flüssiges Obst*, 60(5), 182-187

Ibarz, R., Falguera, V., Garvin, A., Garza, S., Pagan, J., y Ibarz, A. (2009). Flow behavior of clarified orange juice at low temperatures. *Journal of Texture Studies*, 40(4), 445-456

Ibarz, A., y Ortiz, M. (1993). Reología de zumos de melocotón. *Alimentación Equipos y Tecnología*, 12, 81-81

J

Jonsson, J., Kuri, V., Tudorica, C., y Brennan, C. (2004). Dietary fibres: Their uses in dairy based applications. *Dietary Fibre: Bio-Active Carbohydrates for Food and Feed*, 127.

K

Kay, R. M. (1982). Dietary fiber. *Journal of Lipid Research*, 23(2), 221-242

Khalil, K., Ramakrishna, P., Nanjundaswamy, A., y Patwardhan, M. (1989). Rheological behaviour of clarified banana juice: Effect of temperature and concentration. *Journal of Food Engineering*, 10(3), 231-240

Kokini, J., Chang, C., y Lai, L. (1992). The role of rheological properties on extrudate expansion. *Food Extrusion Science and Technology*, 740, 631-652.

Kulkarni Vishakha, S., Butte Kishor, D., y Rathod Sudha, S. (2012). Natural polymers—A comprehensive review. *International Journal of Research in Pharmaceutical and Biomedical Sciences*, 3(4), 1597-1613

L

Leffler, J. E. (1955). The enthalpy-entropy relationship and its implications for organic chemistry. *The Journal of Organic Chemistry*, 20(9), 1202-1231.

Lineback, D. R. (1999). The chemistry of complex carbohydrates. *Food Science and Technology-New York-Marcel Dekker*, 115-130.

Liu, P. (2003). World markets for organic citrus and citrus juices. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*

Lozano, J., y Ibarz, A. (1994). Thixotropic behaviour of concentrated fruit pulps. *LWT-Food Science and Technology*, 27(1), 16-18

M

Ma, L., y Barbosa-Cánovas, G. (1995). Rheological characterization of mayonnaise. part II: Flow and viscoelastic properties at different oil and xanthan gum concentrations. *Journal of Food Engineering*, 25(3), 409-425

Massa, A., González, C., Maestro, A., Labanda, J., y Ibarz, A. (2010). Rheological characterization of peach purees. *Journal of Texture Studies*, 41(4), 532-548

Meyer, D., y Tunglund, B. (2001). Non-digestible oligosaccharides and polysaccharides: Their physiological effects and health implications. *Advanced Dietary Fibre Technology*, 455-470

Moret-Tatay, A., Rodríguez-García, J., Martí-Bonmatí, E., Hernando, I., y Hernández, M. J. (2015). Commercial thickeners used by patients with dysphagia: Rheological and structural behaviour in different food matrices. *Food Hydrocolloids*, 51, 318-326

N

National Research Council (US) Committee on Diet and Health. (1989). *Washington (DC): National Academies Press*

O

Olson, A., Gray, G., y Chiu, M. (1987). Chemistry and analysis of soluble dietary fiber. *Food Technology (USA)*

Özilgen, M., y Bayindirli, L. (1992). Frequency factor-activation energy compensation relations for viscosity of the fruit juices. *Journal of Food Engineering*, 17(2), 143-151

Osorio, F. A., y Steffe, J. F. (1987). Back extrusion of power law fluids 1. *Journal of Texture Studies*, 18(1), 43-63.

Otero, M. B. M., Torneros, J. Z., Ibáñez, E. C., y Álvarez, A. (1989). Evaluación de la tixotropía en leche condensada: Influencia de la temperatura en el comportamiento reológico. *Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos*, 29(4), 519-529

P

Pak, N. (2018). Análisis De Fibra Dietética. Recuperado de <http://www.fao.org/3/AH833S18.htm>

Periago, M. J. Ros, G.; López, G. Martínez, M.C. y Rincón, F. 1993. The dietary fiber components and their physiological effects. *Revista Española de Ciencia y Tecnol. Aliment.* 33(3):229-246.

R

Rajauria, G., y Tiwari, B. K. (2017). Fruit juices: Extraction, composition, quality and analysis. *Academic Press*.

Ramos, A., y Ibarz, A. (1998). Thixotropy of orange concentrate and quince puree. *Journal of Texture Studies*, 29(3), 313-324

Ramos, A. M., y Ibarz, A. (2006). Comportamiento viscoelástico de pulpa de membrillo en función de la concentración de sólidos solubles. *Food Science and Technology*, 26(1), 214-219

Rao, M. A. (2010). *Rheology of fluid and semisolid foods: principles and applications*. Springer Science y Business Media.

Rao, M. A. (2013). *Rheology of fluid, semisolid, and solid foods: Principles and applications* Springer Science & Business Media.

Rao, M., y Cooley, H. (1992). Rheological behavior of tomato pastes in steady and dynamic shear. *Journal of Texture Studies*, 23(4), 415-425

Rha, C. (1978). Rheology of fluid foods in food engineering systems. *Food Technology*, 32(7): 77-82

Rolls, B. J., Bell, E. A., Castellanos, V. H., Chow, M., Pelkman, C. L., y Thorwart, M. L. (1999). Energy density but not fat content of foods affected energy intake in lean and obese women. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 69(5), 863-871.

Rosa, S. (2000). Outlook for concentrated apple juice production and trade in selected countries. *World Horticultural Trade & US Export Opportunities*, (5), 30-35.

Rowles, K. (2000). Processed apple product marketing analysis: Hard cider and apple wine.

S

Sanchez, C., Blanco, D., Oria, R., y SÁNCHEZ-GIMENO, A. C. (2009). White guava fruit and purees: Textural and rheological properties and effect of the temperature. *Journal of Texture Studies*, 40(3), 334-345.

Saravacos, G. (1970). Effect of temperature on viscosity of fruit juices and purees. *Journal of Food Science*, 35(2), 122-125.

Sato, A. C. K., y Cunha, R. L. D. (2007). Influence of temperature on the rheological behavior of jaboticaba pulp. *Food Science and Technology*, 27(4), 890-896

Siche, R., Falguera, V., y Ibarz, A. (2015). Use of response surface methodology to describe the combined effect of temperature and fiber on the rheological properties of orange juice. *Journal of Texture Studies*, 46(2), 67-73

Steffe, J. F. (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering*. Freeman press.

T

The European Commission's science and knowledge service (2011). Dietary Fiber. Recuperado de https://ec.europa.eu/jrc/en/health-knowledge-gateway/promotion-prevention/nutrition/fibre#_Tocch3

Tiziani, S., y Vodovotz, Y. (2005). Rheological effects of soy protein addition to tomato juice. *Food Hydrocolloids*, 19(1), 45-52.

Tudorica, C., Brennan, C., Kuri, V., y Jones, T. (2002). Yoghurt rheology and microstructure as affected by barley glucan inclusion. *Progress in Rheology: Theory and Applications*, 425-427

Tung, M., Richards, J., Morrison, B., y Wastson, E. (1970). Rheology of fresh, aged and gamma-irradiated egg white. *Journal of Food Science*, 35(6), 872-874

V

Van Denffer D, Schumacher W, Magdefrau K, y Ehrendorfer F (1976) Excretory and secretory tissues. *Strasbueger's Textbook of Botany*. Longman, New York, 118–121

Varnam, A. H., y Sutherland, J. P. (1994). Ice cream and related products. *Milk and Milk Products*, 387-431

Villarán, M., Cepeda, E., Llorens, F., y Ibarz, A. (1997). Estudio de la influencia de la temperatura en el comportamiento reológico de mermeladas de albaricoque (*prunus armeniaca*), arándano (*vaccinium myrtillus*) y escaramujo (*rosa canina*). *Food Science and Technology International*, 3(1), 13-19.

Vitali, A. A., y Rao, M. (1982). Flow behavior of guava puree as a function of temperature and concentration. *Journal of Texture Studies*, 13(3), 275-289

W

Wang, A., y Wang, W. (2013). Gum-g-copolymers: Synthesis, properties, and applications. *Polysaccharide based graft copolymers.*,149-203

Y

Yoon, K., y Lee, C. (1990). Effect of powdered cellulose on the texture and freeze-thaw stability of surimi-based shellfish analog products. *Journal of Food Science*, 55(1), 87-91