



TÍTULO

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y REOLÓGICA DE LA PULPA DE BOROJÓ (*BOROJOA PATINOI* CUATREC.) Y PRODUCTOS ALIMENTARIOS DERIVADOS

AUTOR

Raúl Díaz Ocampo

Esta edición electrónica ha sido realizada en 2015

Director	Dr. José María Franco Gómez (Universidad de Huelva)
Instituciones	Universidad Internacional de Andalucía ; Universidad de Huelva
Programa de Doctorado	Programa Interuniversitario de Doctorado en Tecnología de los Procesos y Productos Químicos
ISBN	978-84-7993-842-0
©	Raúl Díaz Ocampo
©	De esta edición: Universidad Internacional de Andalucía
Fecha de lectura	18/12/2014



Reconocimiento-No comercial-Sin obras derivadas

Usted es libre de:

- Copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra.

Bajo las condiciones siguientes:

- **Reconocimiento.** Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciadore (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que hace de su obra).
 - **No comercial.** No puede utilizar esta obra para fines comerciales.
 - **Sin obras derivadas.** No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.
-
- *Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claro los términos de la licencia de esta obra.*
 - *Alguna de estas condiciones puede no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.*
 - *Nada en esta licencia menoscaba o restringe los derechos morales del autor.*

**CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y
REOLÓGICA DE LA PULPA DE BOROJÓ
(BOROJOA PATINOI CUATREC.) Y
PRODUCTOS ALIMENTARIOS DERIVADOS**

Tesis Doctoral presentada por:

RAÚL DÍAZ OCAMPO

Bajo la dirección del doctor:

JOSÉ MARÍA FRANCO GÓMEZ

2014

CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y REOLÓGICA DE LA PULPA DE
BOROJÓ (*BOROJOA PATINOI* CUATREC.) Y PRODUCTOS ALIMENTARIOS
DERIVADOS

Memoria presentada por D. Raúl Díaz Ocampo, para optar al grado de Doctor
por la Universidad Internacional de Andalucía

(firma)

Raúl Díaz Ocampo
Huelva, 2014

José María Franco Gómez, Catedrático del Departamento de Ingeniería
Química, Química Física y Química Orgánica de la Universidad de Huelva
(España),

INFORMA:

La memoria titulada “**Caracterización fisicoquímica y reológica de la pulpa de borojó (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) y productos alimentarios derivados**” que, para optar al grado de Doctor por la Universidad Internacional de Andalucía, presenta D. Raúl Díaz Ocampo, ha sido realizada en los laboratorios de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias Experimentales de la Universidad de Huelva bajo mi dirección. Considerando que este trabajo presenta todos los requisitos para su defensa como Tesis Doctoral, autorizo su presentación en la Universidad Internacional de Andalucía.

Vº Bº Director de la Tesis
Dr. José María Franco Gómez

La presente Tesis Doctoral cumple los requisitos exigidos por la legislación vigente.
(firma y sello del Departamento responsable del Programa de Doctorado)

Dr. José María Franco Gómez
Director del Departamento de Ingeniería Química, Química-Física y Química Orgánica
de la Universidad de Huelva (España)

AUTORIZACIÓN PARA LA DEFENSA DE LA TESIS DOCTORAL EMITIDA POR LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO

DATOS DEL/ DE LA DOCTORANDO/A:

Apellidos y nombre: Díaz Ocampo, Raúl Pasaporte: 0905946612 Nacionalidad: Ecuatoriana
Dirección a efectos de notificaciones: Ciudadela Guayacán, Manzana B6, Villa 6. Quevedo- Los
Ríos (Ecuador).
Teléfono: 593 991789959 EMAIL: rauldiaz63@gmail.com

DATOS DE LA TESIS DOCTORAL:

Título: “**Caracterización fisicoquímica y reológica de la pulpa de borojó
(Borojoa patinoi Cuatrec.) y productos alimentarios derivados**”

Programa Oficial de Doctorado al que se adscribe y órgano responsable:

Procesos y Productos Químicos. Dpto. de Ingeniería Química, Química Física y Química
Orgánica

Línea de investigación a la que se adscribe y órgano responsable:

Reología y procesado de coloides en sistemas alimentarios. Dpto. de Ingeniería Química,
Química Física y Química Orgánica

Director:

Dr. José M^a Franco Gómez

A CUMPLIMENTAR POR LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA DE DOCTORADO:

Una vez valorada la Tesis Doctoral presentada por el/la Doctorando/a y haber incorporado
éste/a las modificaciones y/o cambios que esta Comisión Académica le pudiera haber indicado,
se AUTORIZA, en reunión de fecha _____, **LA DEFENSA** de la
misma.

En Huelva a, _____ de _____ de _____

Firma del/de la Presidente/a de la Comisión Académica
Fdo. Concepción Valencia Barragán

Agradecimientos

El programa de Doctorado “Procesos y Productos Químicos” organizado por la Universidad Internacional de Andalucía conjuntamente con la Universidad de Huelva, ha sido una gran experiencia que jamás olvidaré no sólo por lo que pude aprender de la experiencia investigativa del Grupo de Investigación de Ingeniería en Fluidos Complejos del Departamento de Ingeniería Química, Química Física y Química Orgánica de la Facultad de Ciencias Experimentales de la Universidad de Huelva, sino también por las ideas que pude intercambiar con los miembros de dicho colectivo, por su amabilidad y colaboración prestada en la ejecución de esta memoria de Tesis doctoral.

Tengo que decir, que me he encontrado muy a gusto en este país, la acogida ha sido excelente, he tenido la oportunidad de conocer y tratar a personas estupendas que me han ayudado a alcanzar el objetivo que me propuse al ser admitido en la UNIA. Además he tenido el privilegio de conocer la gran belleza de este país, en particular de Andalucía, que siempre recordaré por la calidez de su gente y por todo lo que viví en mis estancias doctorales.

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que de una o de otra manera han contribuido para la realización de la presente tesis doctoral, tanto a nivel científico como personal.

En primer lugar, a mi director Dr. D. José María Franco Gómez, por su valiosa orientación y ayuda, por su increíble capacidad de trabajo, por compartir sus conocimientos, por su paciencia y su entusiasmo ya que su apoyo constante durante estos años, ha hecho posible la realización de este proyecto.

Asimismo agradezco la colaboración en la parte experimental del trabajo al Dr. D. Rubén Sánchez Martínez, por ayudarme siempre y en todo momento en la realización de este trabajo.

A la Universidad Internacional de Andalucía por el apoyo brindado para realizar el Master y Doctorado en Formulación y Tecnología del Producto.

A la Universidad Técnica Estatal de Quevedo por concederme el aval académico y las ayudas para realizar las estancias del doctorado.

Y a todos mis familiares y amigos que han creído en mí, que me han alentado en los momentos más duros

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1 Resumen.....	3
1.2 Justificación.....	7
1.3 Objetivos.....	8
1.4 Estructura.....	9
Capítulo 2: Conceptos y generalidades.....	11
2.1 Descripción del borojó (<i>Borojoa patinoi</i> Cuatrec.).....	13
2.1.1 Origen y taxonomía del borojó.....	13
2.1.2 Ecología y adaptación del borojó.....	14
2.1.3 Descripción botánica del borojó.....	14
2.1.4 Métodos de cultivo.....	15
2.1.5 Establecimiento y manejo.....	16
2.1.6 Principales plagas y enfermedades.....	17
2.1.7 Cosecha y poscosecha.....	18
2.1.8 Producción.....	19
2.1.9 Usos del borojó.....	19
2.1.10 Composición química.....	21
2.1.11 Antecedentes de la caracterización de la pulpa de borojó.....	22
2.2 Conceptos básicos de Reología.....	24
2.2.1. Tensor esfuerzo.....	25
2.2.2 Tensor deformación y velocidad de deformación.....	28
2.2.3 Cizalla simple.....	29
2.2.4 Caracterización reológica de un material.....	31
2.2.5 Clasificación de los distintos comportamientos reológicos.....	32
2.2.6 Comportamiento de flujo viscoso.....	34
2.2.7 Comportamiento dependiente del tiempo de cizalla.....	37
2.2.8 Comportamiento viscoelástico.....	38
2.2.8.1 Ensayos de fluencia (“creep”) y recuperación.....	40
2.2.8.2 Ensayos de relajación del esfuerzo.....	41
2.2.8.3 Ensayos dinámicos de cizalla oscilatoria.....	41
2.3 Reología de alimentos derivados de frutas y hortalizas.....	49
2.3.1 Generalidades sobre Reología de alimentos.....	49

2.3.2 Comportamiento fluidodinámico de alimentos derivados de frutas y hortalizas	55
2.3.2.1 Factores que influyen en el comportamiento de flujo.....	59
2.3.2.1.1 Efecto de la temperatura.....	59
2.3.2.1.2 Efecto de la concentración de sólidos.....	61
2.3.3 Reología de pulpa de frutas.....	62
2.3.3.1 Caracterización reológica de la pulpa de frutas tropicales..	64
2.3.4 Reología de productos derivados de la pulpa de fruta.....	66
Capítulo 3: Materiales y métodos.....	69
3.1 Materia prima.....	71
3.2 Elaboración de mermeladas, con adición de diferentes concentraciones de pectina.....	72
3.2.1 Diagrama del proceso de elaboración de mermeladas de borjón.....	73
3.2.2 Formulación de mermeladas artesanales a partir de la pulpa de borjón	75
3.2.3 Envasado.....	76
3.3 Desarrollo de batidos de leche de soya y borjón, con diferentes concentraciones de sólidos.....	76
3.3.1 Preparación de las muestras.....	77
3.4 Muestras de productos alimentarios comerciales derivados de la pulpa de borjón.....	78
3.5 Caracterización bromatológica y fisicoquímica.....	79
3.5.1 Determinación de la humedad.....	79
3.5.2 Determinación de cenizas.....	80
3.5.3 Determinación de extracto etéreo.....	80
3.5.4 Determinación del contenido en proteínas.....	81
3.5.5 Determinación de sólidos solubles.....	83
3.5.6 Determinación de acidez total titulable.....	83
3.5.7 Determinación de pH.....	84
3.5.8 Determinación de fibra cruda.....	85
3.5.9 Determinación de carbohidratos totales.....	85
3.5.10 Cálculo del valor energético.....	86
3.5.11 Determinación del contenido de fósforo.....	86

3.5.12 Determinación de hierro y calcio.....	87
3.6 Evaluación microbiológica de la pulpa de borjón.....	87
3.6.1 Recuento total de aerobios.....	87
3.6.2 Recuento de coliformes fecales.....	87
3.6.3 Recuento de hongos y levaduras.....	88
3.7 Caracterización reológica.....	88
3.8 Evaluación sensorial.....	91
3.8.1 Selección de panel de catadores.....	92
3.8.2 Detección de gustos básicos.....	93
3.8.3 Selección de atributos sensoriales.....	94
3.8.4 Pruebas descriptivas.....	95
3.8.5 Prueba triangular.....	96
Capítulo 4: Resultados y discusión.....	99
4.1 Caracterización de la pulpa de borjón (<i>Borojoa patinoi</i> Cuatrec.).....	101
4.1.1 Composición bromatológica y fisicoquímica.....	101
4.1.2 Características microbiológicas.....	104
4.1.3 Caracterización reológica.....	105
4.1.3.1 Ensayos en flujo estacionario.....	105
4.1.3.2 Ensayos oscilatorios.....	107
4.2 Caracterización de mermeladas de borjón con adición de diferentes concentraciones de pectina.....	111
4.2.1 Parámetros fisicoquímicos.....	111
4.2.2 Caracterización reológica.....	112
4.2.2.1 Ensayos oscilatorios SAOS	112
4.2.2.2 Comportamiento de flujo viscoso.....	123
4.2.3 Evaluación sensorial.....	129
4.3 Caracterización de batidos de leche de soya con borjón con diferentes concentraciones de sólidos solubles.....	132
4.3.1 Parámetros fisicoquímicos.....	132
4.3.2 Caracterización reológica.....	133
4.3.2.1 Comportamiento de flujo viscoso.....	133
4.3.2.1.1 Efecto de la concentración de sólidos solubles sobre los índices de consistencia y flujo en batidos de soya con borjón.....	140
4.3.2.1.2 Efecto de la temperatura sobre los índices de consistencia	

y flujo en batidos de soya con borojó.....	142
4.3.3 Evaluación sensorial.....	146
Capítulo 5: Conclusiones.....	151
Capítulo 6: Bibliografía.....	157
Capítulo 7: Anexos.....	177
7.1 Publicaciones derivadas de la Tesis Doctoral.....	179
7.1.1 Artículos científicos.....	179
7.2 Propuestas de trabajo futuras derivadas de la Tesis Doctoral.....	179
7.3 Trabajos de investigación desarrollados a partir de la Tesis Doctoral	180

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Abstract

This doctoral thesis was done in the framework of development and rheological characterization of fruit pulps and derived food products. Specifically, the fresh pulp of borojó (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) from the province of Los Rios (Ecuador) was used as raw material for the formulation and development of products such as jams and smoothies, studying their nutritional, physicochemical, microbiological and rheological properties as well as some sensorial parameters.

A full physicochemical and rheological characterization of both borojó fresh pulp and derived jams and smoothies formulations was performed as a result of this research, the knowledge generated could be applied to the industrial processing of this pulp.

Attending the great variability of rheological data available for tropical fruits pulp, the major challenge of this research was to fully characterize the rheological behavior of borojó pulp (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) and some derived food products such as jam formulations, with the addition of different pectin concentrations, and smoothies with different solid content. In general, in addition to the physicochemical and rheological characterization of these products, a sensory analysis was performed and the influence of some formulation parameters and temperature on the rheological behavior was analyzed.

As a result of this investigation, finally, a series of formulations that could be potentially commercialized was proposed.

Borojó pulp (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) has a low pH and important levels of carbohydrates and calcium, and its microbiological quality is optimal, with counts of microorganisms that are within the allowed range according to regulations. Besides this, borojó pulp behaves like a non-Newtonian shear thinning fluid, also with gel-like characteristics. Temperature does not significantly influence the rheological behavior of borojó pulp.

The viscous flow behaviour of model borojo jams, prepared with different pectin concentrations, was well described by the Herschel-Bulkley model. Linear viscoelastic functions and viscosity values increased with pectin concentration and decreased by increasing temperature. Resulting jam model formulations with low pectin concentrations were more similar to the commercial borojo jam used as a reference.

Model and commercial smoothies prepared with soya milk and borojo pulp show a shear thinning flow behaviour which can be described by the power-law model. In general, the flow index increases with the solid content and decreases potentially with temperature, excepting for the system with the lower solid content. The effect of solid content on the consistency index of borojo-based smoothies may be described by a power-law equation whereas the effect of temperature was described by an Arrhenius-type relationship, with values of the activation energy which decrease as solid content increases.

The different borojo pulp-based jam and smoothie formulations were also submitted to sensory evaluation by a semi-trained taste panel. The different products were positively evaluated and some of them (jam with 1% pectin and smoothie with 14° Brix) did not show any significant difference in the sensory parameters respecting the commercial samples used as references.

1.1 Resumen

Este trabajo de Tesis Doctoral se enmarca dentro del campo de la formulación y caracterización reológica de pulpas de frutas y productos alimentarios derivados. En concreto, la pulpa fresca de borjón (*Borjoa patinoi* Cuatrec.) proveniente de la Provincia de Los Ríos (Ecuador), se utilizó como materia prima para la formulación y desarrollo de productos derivados como mermeladas y batidos, estudiando sus propiedades nutricionales, fisicoquímicas, microbiológicas y reológicas, así como algunos parámetros sensoriales.

Se realizó una completa caracterización fisicoquímica y reológica tanto a la pulpa fresca de borjón como a las formulaciones desarrolladas de mermeladas y batidos. Como resultado de esta investigación, los conocimientos generados sobre el comportamiento de la pulpa de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) podrían ser utilizados en el procesamiento industrial de dicha pulpa.

Dada la variabilidad de los datos reológicos disponibles para pulpas de frutas tropicales, el gran reto de esta investigación es caracterizar de forma exhaustiva el comportamiento reológico (viscoso y viscoelástico) de la pulpa de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) y de productos derivados. Así pues, se ha pretendido caracterizar diversas formulaciones de mermeladas, con la adición de diferentes concentraciones de pectina y de batidos de diversas concentraciones de sólidos. En general, en este estudio además de una caracterización fisicoquímica y reológica de estos productos, se ha realizado un análisis sensorial y se ha evaluado la influencia de algunos parámetros de formulación y de la temperatura sobre el comportamiento reológico.

Como resultado de esta investigación, finalmente, se proponen una serie de formulaciones que podrían ser potencialmente comercializadas.

La pulpa de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) presenta un bajo pH, y tiene niveles importantes de carbohidratos y calcio, y su calidad microbiológica es óptima, con recuentos de microorganismos que están dentro de los rangos permitidos según la normativa. Por otra parte, se comporta como un fluido no newtoniano de carácter pseudoplástico, con un comportamiento más elástico que viscoso, similar a un gel. Los resultados de los ensayos de flujo y oscilatorios muestran que la temperatura influye escasamente en la respuesta reológica de la pulpa de borjón.

El flujo viscoso de mermeladas artesanales de borjón, con adición de diferentes concentraciones de pectina, se describe adecuadamente

mediante el modelo de Herschel-Bulkley. Las funciones viscoelásticas lineales y los valores de viscosidad aumentan con la concentración de pectina y disminuyen al aumentar la temperatura, resultando las mermeladas artesanales con bajas concentraciones de pectina, más similares a la mermelada comercial de dicha fruta utilizada como referencia.

El flujo viscoso de los diferentes batidos artesanales y de un batido comercial de leche de soya con borrojó muestra, en todos los casos, un comportamiento pseudoplástico, con una caída potencial de la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla, pudiéndose describir satisfactoriamente mediante la ley de la potencia. En general, el índice de flujo disminuye potencialmente con la temperatura y aumenta con la concentración de sólidos solubles, a excepción del batido con 8° Brix, que se caracteriza por índices de flujo relativamente altos.

El efecto de la concentración de sólidos solubles sobre el índice de consistencia en batidos de soya con borrojó puede representarse adecuadamente mediante una ecuación potencial, mientras que el efecto de la temperatura se describe mediante la ecuación de Arrhenius, con valores de la energía de activación que disminuyen conforme aumenta la concentración de sólidos solubles.

Las diferentes mermeladas y batidos preparados con pulpa de borrojó fueron también evaluados sensorialmente por un panel semi-entrenado de catadores. Los diferentes productos fueron valorados positivamente y en algunos de ellos (mermelada con 1% de pectina añadida y batido con 14° Brix) no se detectaron diferencias significativas en los atributos sensoriales comparados con muestras comerciales de referencia.

1.2 Justificación

La tendencia de consumo de alimentos está relacionada con la demanda de frutas procesadas, debido a que los consumidores

requieren alimentos confiables y saludables con alto contenido de vitaminas. Hay un creciente interés por los productos orgánicos, frutos silvestres y exóticos. En los últimos años, se ha centrado la atención en la caracterización, manejo y transformación de especies frutales promisorias de la amazonia y su uso en la industria alimentaria.

Las especies exóticas amazónicas comestibles, entre ellas el borojó (*Borojoa patinoi* Cuatrec.), han adquirido relevancia en la última década en los países andinos, constituyendo una importante alternativa productiva. Se hace entonces indispensable un apropiado desarrollo tecnológico para su conservación y aprovechamiento industrial.

En la actualidad, se lleva a cabo un proceso de domesticación de estas especies, abordándose aspectos agronómicos para la producción y transformación, con lo cual el proceso productivo ha trascendido del extractivismo al cultivo de huerto comercial con alto potencial para hacer parte de los arreglos agroforestales y de policultivo de frutales. De esta manera los volúmenes de producción aumentan, convirtiéndose en una alternativa productiva sostenible y amigable con el ambiente para las comunidades asentadas en la zona, siempre y cuando se generen los adecuados niveles de mercado.

El borojó (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) es una fruta exótica, con buenas perspectivas para su uso en la industria alimentaria por su sabor y aroma agradable. Sin embargo, es una fruta que no ha sido ampliamente utilizada para el procesamiento industrial.

La inexistencia de datos reológicos para diversas pulpas de frutas tropicales lleva a la industria a aplicar, en el procesamiento de pulpas y jugos, condiciones semejantes a las aplicadas en la producción de jugo de naranja, a pesar de las características diferentes de cada fruta, acarreando errores en el diseño y control del proceso.

La presente investigación se puede justificar atendiendo a la necesidad y/o conveniencia de dos hechos fundamentales: la caracterización fisicoquímica y reológica de la pulpa de borojó (*Borojoa*

patinoi Cuatrec.) y el estudio de productos alimentarios derivados y su inclusión en el mercado de nuevos productos actualmente no ofertados.

Por un lado, existe una preocupación creciente por el desarrollo sostenible, que puede dividirse conceptualmente en ambiental, económico y social. Por lo tanto, el diseño y desarrollo de productos alimentarios derivados de frutas amazónicas, estaría plenamente enmarcada en el desarrollo ambiental que actualmente es perseguido en todos los campos de la industria moderna.

Por otro lado, atendiendo a este desarrollo ambiental, la industria está demandando productos que cumplan con este requisito pero, a su vez, sean tecnológicamente eficaces y competitivos. Así pues, existe un nuevo mercado dispuesto a incorporar este tipo de nuevos productos.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es el desarrollo de nuevas formulaciones de productos alimentarios derivados de la pulpa fresca de borjón (*Borjoa patinoi* Cuatrec.).

En cuanto a los objetivos específicos de la investigación, se plantea, por un lado, estudiar las propiedades fisicoquímicas, microbiológicas y reológicas de la pulpa fresca de borjón (*Borjoa patinoi* Cuatrec.) y por otro lado, las propiedades fisicoquímicas, sensoriales y reológicas de productos alimentarios derivados como mermeladas y batidos.

1.4 Estructura

Esta Tesis Doctoral está dividida en siete capítulos. Además de este capítulo introductorio, en el Capítulo 2, se exponen una serie de generalidades sobre el fruto de borjón (*Borjoa patinoi* Cuatrec.) y su importancia en la sociedad actual, así como algunos conceptos básicos sobre reología y una revisión del estado del arte sobre la caracterización

reológica de pulpas de frutas y productos derivados. En el Capítulo 3, se describen todos aquellos materiales que se han utilizado para la caracterización de la pulpa fresca de borjón (*Borjoa patinoi* Cuatrec.) y el desarrollo de productos alimentarios derivados, así como su procesado, y aquella metodología experimental empleada para la caracterización de estos nuevos productos. En el Capítulo 4, se presentan una serie de resultados experimentales obtenidos sobre las propiedades nutricionales, microbiológicas, fisicoquímicas y reológicas de la pulpa fresca de borjón (*Borjoa patinoi* Cuatrec.). Además, se muestran aquellos resultados obtenidos con las formulaciones de mermeladas artesanales, con la adición de diferentes concentraciones de pectina y posteriormente se analizan los resultados obtenidos con los batidos de leche de soya con pulpa de borjón, procesados con diferentes concentraciones de sólidos solubles.

En el Capítulo 5 se exponen las conclusiones más relevantes que se pueden deducir de los resultados experimentalmente obtenidos.

En el Capítulo 6 se recoge la bibliografía utilizada para llevar a cabo esta investigación. Por último, en el Capítulo 7, se hace referencia al estado de difusión de los resultados de este trabajo, así como los proyectos de trabajo futuros derivados de esta investigación.

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS Y GENERALIDADES

2.1 Descripción del borojón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.)

2.1.1 Origen y taxonomía del borojón

El borojón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) es una especie arbórea perteneciente a la división Magnoliophyta, clase Magnoliopsida, orden Rubiales, familia Rubiaceae, que crece principalmente en Panamá (Darién), Colombia, y Ecuador, especialmente en las zonas de bosques húmedos, con temperaturas aproximadas de 24°C a 28°C, humedad relativa de 85% y se adapta a alturas de hasta 1200 m [Hollihan, 2004].



Figura 2.1. Planta de borojón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.).

Su nombre proviene del dialecto citara y significa “árbol de cabeza colgante” [Arango, 1986]. El borojón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) es una especie que ha evolucionado con el ritmo de la interacción selva-hombre, dándole características especiales al sentido de la evolución cultural [Mosquera y Arenas, 1995].

2.1.2 Ecología y adaptación del borojón

El borojón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) se desarrolla de manera silvestre en zonas donde la precipitación media anual es mayor a 4000 mm/año, con temperaturas medias de 28 °C y una humedad relativa del 85% y en condiciones de sombra producidas por otras especies arbóreas. Se adapta bien a zonas hasta 1200 msnm. Crece muy bien en suelos francos limosos, profundos, con alto contenido de materia orgánica y buen drenaje [Hollihan, 2004; Jaramillo et al., 2005].

En Ecuador, el borojón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) se encuentra en las seis provincias amazónicas. El Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias (INIAP), en los actuales momentos difunde su cultivo dentro de los sistemas agroforestales del país. Se han obtenido los mejores resultados en plantaciones que están localizadas a 300 msnm, con precipitaciones de 3000 mm y una temperatura de 26 a 30°C. (Lago Agrio, Shushufindi, Sacha y Francisco de Orellana). Existen huertas en las provincias de Esmeraldas y Los Ríos [CORPEI, 2005].

2.1.3 Descripción botánica del borojón

El borojón es un arbusto de 3 a 5 m de altura. Su tallo es erecto y sus hojas desusadas, con estípulas bien definidas y coriáceas. Es una planta dioica.

Las flores masculinas se disponen en capítulos y están desprovistas de ovario, aunque en ocasiones este sistema es rudimentario y no funciona. Las flores femeninas son solitarias y terminales, con dos pares de estípulas bracteales y seis estigmas largos; ovario ínfero, y muchos óvulos [Jaramillo et al., 2005; Medina y Sepúlveda, 2006].

El fruto es una baya carnosa de 7 a 12 cm de diámetro, puede ser periforme y generalmente achatado en el ápice, en sus primeros estadios es verde y se torna marrón al madurar.



Figura 2.2. Fruto de borojó (*Borojoa patinoi* Cuatrec.).

La pulpa está constituida por el mesocarpio y el endocarpio, sin separación aparente con la cáscara. El mesocarpio es carnoso, de color café y muy viscoso. Posee un número variable de semillas de 90 a 640, promedio de 330 semillas por fruto y se considera maduro cuando cae al suelo [Mejía, 1984].

2.1.4 Métodos de cultivo

Las semillas deben tomarse de frutos maduros provenientes de plantas seleccionadas; se las lava con agua y se las deja secar a la sombra durante dos días. La semilla debe germinar a la sombra, en sustrato de aserrín descompuesto, arena o tierra vegetal, pero que se encuentre permanentemente húmedo.

Las plántulas recién germinadas se asemejan a palitos de fósforo, su crecimiento es muy lento, por lo que deberán permanecer en el vivero alrededor de nueve meses, hasta que alcancen el tamaño adecuado (aproximadamente 35 cm) para ser trasplantadas al campo definitivo.

Debido a que la especie es dioica, las plantas masculinas (teóricamente el 50%) no producen frutos, por lo que es conveniente la propagación de las plantas femeninas por la vía asexual, a través de injertos. El ambiente debe estar totalmente sombreado y la humedad relativa debe ser mayor al 85%, para que la plántula tenga un normal desarrollo y esté lista para ser injertada. El tiempo que debe permanecer la planta en el vivero, una vez hecho el injerto hasta ser trasplantada al campo definitivo, es de cuatro meses [Jaramillo et al., 2005].

2.1.5 Establecimiento y manejo

Se recomienda establecer el cultivo de borjón en sistemas agroforestales, por lo que antes de realizar la siembra, es conveniente contar con sombra temporal, que puede ser de plátano (*Musa sapientum*), sembrado a una distancia de 4 x 4 m entre plantas e hileras, el cual permanecerá hasta el segundo año de edad. El borjón inicia su producción a los tres años y en el caso de las plantas producidas por vía asexual puede acelerarse. Se recomienda sembrar el borjón a una distancia entre plantas de 3 x 4 m. Se debe incluir por lo menos el 5% de plantas masculinas en la plantación para distribuir equilibradamente una buena polinización [Mosquera y Arenas, 1995].

El borjón es una planta que requiere de fertilización para satisfacer las necesidades nutricionales durante la etapa de desarrollo y producción. Es exigente en N, P y K; el N se requiere en mayor cantidad en el desarrollo vegetativo [Jaramillo et al., 2005].

Las plantas deben estar libres de malezas. Para evitar la incidencia de malezas se recomienda sembrar leguminosa forrajera kudzú (*Pueraria phaseoloides*) como cobertura, sin embargo, se deben realizar controles de malezas por lo menos tres veces al año [Jaramillo et al., 2005].

En el primer año de vida la planta de borjón no necesita ser podada, la primera poda se realiza a los dos años, para que de esta manera pueda alcanzar un crecimiento óptimo y la época de floración tenga la mayor productividad [Mosquera y Arenas, 1995].

La maduración del borjón puede inducirse en cámaras con humedad relativa de 100% y temperatura de 20°C. A 100% de humedad relativa y 30°C de temperatura, ocurre menor pérdida de peso en el proceso. Los frutos colectados del suelo pueden completar su maduración en 24 horas en estas cámaras, mientras que los cosechados en sazón pueden demorar 20 días, lo que facilita su posibilidad de transporte a largas distancias.

Los frutales, entre ellos el borjón, se caracterizan por presentar una gran variabilidad genética que determina una marcada diversificación en las características físicas y químicas de sus frutos, que depende de factores exógenos como, el manejo agronómico de la plantación, la época de cosecha y el estado de madurez de los frutos. La oferta de la diversidad presente en la región amazónica posee un interés notable. Los sistemas productivos que incluyen el establecimiento de arreglos agroforestales contribuyen a la conservación de la biodiversidad y al mantenimiento de dicho recurso y en ellos los frutales aparecen como un componente de rápido crecimiento y producción [Hernández, 2007].

2.1.6 Principales plagas y enfermedades

No se han observado plagas y enfermedades que afecten de manera significativa la producción del borjón, excepto la hormiga arriera (*Atha*

cephalotes), la cual puede llegar a defoliar la planta si no se controla oportunamente mediante el uso de cebos y polvos tóxicos. Ocasionalmente, se ha encontrado también un micro lepidóptero que, en estado de larva, puede causar daño muy semejante al que producen algunos insectos minadores de las hojas de las anonáceas [Jaramillo et al., 2005].

La especie no tiene enfermedades conocidas; excepto problemas de presencia de manchas negras en la cáscara de la fruta y su posterior cuarteadura y engrosamiento, producidos por la acción de los rayos solares directos [Mejía, 1984].

2.1.7 Cosecha y poscosecha

Estudios efectuados con borojó (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) indican que el fruto no tiene climaterio, por lo que no concluye la maduración si se cosecha verde. Por este motivo, la fruta debe ser colectada inmediatamente después de la caída o cosechada en estado “sazón”. El estado “sazón” de la fruta en una rama se reconoce por la caída de todas las hojas de la rama, la fruta toma color verde oscuro y las estípulas del fruto se pudren. En este estado la fruta puede ser transportada a grandes distancias en empaques corrientes. Conforme madura la fruta recogida del suelo, toma color pardo claro y consistencia blanda, por lo que necesita transportarse rápidamente en recipientes especiales, lo cual eleva el costo de comercialización [Mejía, 1984].

El borojó fisiológicamente maduro es el que cae del árbol y se caracteriza especialmente por presentar un color café oscuro, perfumado y sabor agrio suave. En su interior, los tejidos de la fruta son carnosos y untuosos, casi pegajosos, y sin ningún tipo de endurecimiento. El fruto se colecta del suelo, después de su caída natural, cuando ha completado su desarrollo fisiológico. En este estado, los frutos son muy perecibles, puesto

que han alcanzado la maduración adecuada para el consumo. Se recomienda efectuar colectas diarias.

Cuando está verde, la cosecha no es recomendable, puesto que todavía no posee el mismo contenido nutritivo. El tiempo en madurar un fruto desde su fecundación hasta la caída va desde los nueve a los doce meses.

2.1.8 Producción

El borojón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) inicia su producción a los tres años y en el caso de las plantas producidas por vía asexual puede acelerarse. El rendimiento estimado para una plantación de 625 árboles/ha puede ser de 30000 frutos, con 15 a 20 t/ha. La producción puede variar en los diferentes años, porque la especie presenta alternancia de años buenos con años malos. Si es cultivado bajo sistemas agroforestales y en distancia de 3x4 m produce alrededor de 10000 frutos/ha [Mejía, 1984].

El borojón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) se encuentra en una etapa de introducción en Ecuador ya que es una planta que se desarrolla en condiciones óptimas en las regiones tropicales húmedas, es bastante resistente a plagas y enfermedades y de fácil cultivo. La explotación se divide principalmente a nivel de monocultivo, en cultivo asociado con otras especies o la producción de árboles dispersos, ya se empieza a mostrar gran interés por parte de los productores agrícolas para domesticarlo y producirlo intensivamente.

2.1.9 Usos del borojón

Tradicionalmente, las comunidades indígenas asentadas en la zona amazónica de donde proviene el borojón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.), lo han utilizado como alimento y producto curativo; entre los usos medicinales se

menciona que es satisfactorio para cicatrizar heridas, controlar el azúcar en la sangre o la hipertensión. Estas comunidades lo consideran un alimento con alto valor nutritivo por su alto contenido en minerales, más que por el sabor de la fruta [Hollihan, 2004].

A pesar de ser una fruta poco perecedera y de alta disponibilidad en su medio natural, el borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) es un producto de difícil manejo debido a su consistencia y peso, por tal razón, se hace necesario emplear diversos métodos para la manipulación, entre estos el despulpado (Mosquera et al., 2006). La pulpa de la fruta madura de borjón puede conservarse en nevera, en envases herméticos, por hasta seis meses sin necesidad de aditivos [CORPEI, 2005].

El borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) posee propiedades alimenticias por contener aminoácidos esenciales y ser fuente de calcio, hierro, fósforo y vitamina C. Posee metabolitos secundarios de gran interés como modelos químicos para nuevos fármacos y propiedades que le atribuye la medicina tradicional y popular como diurético, cicatrizante, afrodisíaco y antitumoral [Gentry, 1988].

Los nativos lo han empleado tradicionalmente como cicatrizante y para embalsamar cadáveres. Además, se le han atribuido propiedades energizantes [Sotelo et al., 2010].

Los usos de esta fruta son diversos, ya sea en forma natural o como productos elaborados. Así, la pulpa de la fruta es utilizada para elaborar jugos, mermeladas, compotas, dulces, helados y vino de borjón. La aplicación más novedosa del borjón consiste en la preparación de bebidas energizantes o reconstituyentes, pues es considerado un aporte energético natural (CORPEI, 2005).

No obstante, su comercialización está muy limitada a las regiones donde se cultiva. La posibilidad de producir un fruto seco por

atomización o liofilización abre nuevas alternativas para su comercialización a nivel internacional. [Mosquera et al., 2010]

2.1.10 Composición química

A continuación, se presenta el valor nutricional de 100 g de la pulpa de borojón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) [Jaramillo et al., 2005].

Tabla 2.1 Componentes bromatológicos y fisicoquímicos de la pulpa fresca de borojón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.).

Parámetro	Resultados
Humedad (g/100g)	84,62
Extracto etéreo (g/100g)	0,22
Proteína (g/100g)	0,88
Fibra dietética (fracción sol.) (g/100g)	3,61
Fibra dietética (fracción insol.) (g/100g)	5,52
Cenizas (g/100g)	0,42
Carbohidratos totales (g/100g)	13,86
Calorías /100g	55
Calcio (mg/100g)	10,58
Fósforo (mg/100g)	0,23
Hierro (mg/100g)	0,510
Pro-vitamina A (β Carotenos) (mg/100g)	LND
Vitamina B1 (mg/100g)	0,006 \pm 0.01
Vitamina B2 (mg/100g)	LND
Vitamina C (mg/100g)	142,6 \pm 2.9
Azúcares totales aproxim.(mg/100g)	5266
Glucosa (mg/100g)	871 \pm 49.6
Fructosa (mg/100g)	3917 \pm 48,5
Sacarosa (mg/100g)	478 \pm 73,8
pH	3,08
Acidez titulable (g/100g)	1,06

LND: Limite no detectable.

2.1.11 Antecedentes de la caracterización de la pulpa de borojón

La pulpa de borojón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) es altamente energética y nutritiva, con alto contenido de sólidos solubles, aminoácidos y fósforo [Mosquera et al., 2005].

La pulpa es de color café, ácida y densa, es el producto carnosos y comestible de la fruta, obtenido por procesos tecnológicos adecuados de buenas prácticas de postcosecha y manufactura [INEN, 2008].

La pulpa de la fruta madura de borojón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) puede conservarse en condiciones ambientales o en nevera, y en envases herméticos por hasta seis meses sin necesidad de aditivos. La parte comestible puede ser procesada en forma de pulpa o de hojuelas deshidratadas, la pulpa es muy adhesiva, por lo que deben utilizarse envases de plástico o de vidrio. Se han estudiado algunas características de las propiedades funcionales de la pulpa obtenida mediante el secado por aspersión y el efecto de la maltodextrina en la estabilidad de la pulpa seca por liofilización [Mosquera et al., 2010].

En la superficie del fruto o de la pulpa se desarrollan frecuentemente micelios de hongos, probablemente *Aspergillus* y *Penicillium*, la cual debe ser prevenida mediante un buen lavado y desinfección antes del despulpado. En el fruto estos hongos no causan daño, porque no pasan el pericarpio [Mejía, 1984].

La caracterización bromatológica y fisicoquímica de la pulpa de borojón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) ha sido realizada por diversos autores. El valor de humedad de la pulpa de borojón publicado por Mejía [1984] es de 69 %, mientras que Mosquera (2005) encontró un valor de 64,83 %. Este contenido en humedad favorece el procesamiento de néctar, vino y otros.

El porcentaje de sólidos solubles publicado por Mejía [1984] es de 29 a 41° Brix. Los valores publicados de contenido en cenizas de la muestra de pulpa del borjón son de 1,2 % [Mejía, 1984] y de 0,801 % [Sotelo et al., 2010]. El porcentaje de cenizas está asociado al contenido mineral y, en general, depende del manejo agronómico del cultivo.

El pH publicado por otros autores en la pulpa de esta fruta es de 3,08 [Jaramillo et al., 2005] y de 3,12 [Sotelo et al., 2010]. La pulpa estudiada presenta valores inferiores a los hallados en frutos como el noni [Chan-Blanco, 2006], perteneciente también a la familia de las Rubiáceas y la naranja [Topuz et al., 2005]. El pH es importante en el control del desarrollo de poblaciones de microorganismos, de la actividad de sistemas enzimáticos, en el proceso de clarificación de jugos y bebidas, en la estabilidad de los mismos y de otros productos elaborados a partir de la pulpa de frutas como jaleas y mermeladas, cuya firmeza, color y sabor están determinados por la concentración de iones hidrógeno.

La acidez titulable de la pulpa de borjón encontrada por otros autores, teniendo en cuenta como ácido mayoritario el ácido málico, fue de 1,78 [CORPEI, 2005] y de 1,06 [Jaramillo et al., 2005]. El cálculo de carbohidratos totales publicado por [Jaramillo et al., 2005] de 13,86% en la pulpa de borjón refleja un alto contenido de carbohidratos. El contenido de carbohidratos totales influye notablemente en el sabor de las frutas y es uno de los factores intrínsecos que favorece el crecimiento de las poblaciones de bacterias y mohos propios de la microflora [Jay, 1992].

El valor publicado de extracto etéreo en la pulpa de borjón fue de 0,22 % [Jaramillo et al., 2005] y de 0,83 % [Salamanca et al., 2010]. En general, las frutas y los vegetales contienen muy bajas concentraciones de contenido graso, aunque existen algunas excepciones, tales como el aguacate, aceitunas, y algunas nueces, que en promedio tienen 20% de lípidos [Badui, 1996].

El bajo contenido proteico de la pulpa de borjón, de 0,8 % [Mejía, 1984] o 1,75% [Mosquera, 2005], indica ser inapropiada como fuente proteica.

El contenido de sólidos solubles, la firmeza de los frutos, el color de la pulpa, el contenido de fibra en raíces y tallos, el grado de turgencia que presentan al ser procesados, son algunos de los atributos que inciden en la calidad industrial del borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) como materia prima.

Debido a la aceptación y comercialización cada vez más creciente de los productos derivados del borjón, se requiere una información científica más amplia sobre las propiedades fisicoquímicas de esta fruta.

Por ello se considera interesante el estudio del comportamiento reológico de la pulpa de esta fruta para su caracterización y utilización en el desarrollo de nuevos productos. Las características reológicas de un fluido complejo es uno de los criterios esenciales en el desarrollo de productos en la industria alimentaria, en el control de calidad, así como en la comprensión y caracterización de atributos texturales. Además, las propiedades reológicas de los distintos alimentos, normalmente tienen gran importancia en el procesado, transporte y almacenamiento [Steffe, 1996].

2.2 Conceptos básicos de Reología

La Reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de los materiales, proviniendo esta palabra del verbo griego “*ρειν*”, que significa fluir. El concepto fue introducido por Eugene Bingham en 1920 [Macosko, 1994] con el fin de definir, de una forma más precisa, la mecánica de los cuerpos deformables, restringida hasta entonces a la elasticidad clásica de Hooke y a la mecánica de fluidos de Newton. El nacimiento de la Reología

como ciencia diferenciada se produjo en la primera mitad del siglo XX como consecuencia del interés que suscitaron el desarrollo y utilización a nivel industrial. Todos los materiales tienen propiedades reológicas, de ahí su relevancia en muchos campos de estudio como el de plásticos, la industria de pinturas, cosmética, alimentaria, disoluciones de polímeros, fluidos biológicos, suspensiones coloidales [Steffe, 1996]. La Reología estudia la relación existente entre las fuerzas externas que actúan sobre un cuerpo y la deformación que éstas producen [Van Wazer et al., 1963]. Dado que el movimiento de cada una de las partículas que forman un cuerpo está sometido a las leyes de la Mecánica, la Reología se basa en dicha rama de la Física.

Para entender el comportamiento reológico de los materiales es necesario definir primeramente algunos conceptos, como los que se detallan a continuación:

2.2.1. Tensor esfuerzo

En general, sobre un elemento material cualquiera pueden actuar dos tipos de esfuerzos, los esfuerzos normales, que se refieren a la componente en dirección perpendicular a la superficie considerada, y esfuerzos de cizalla o cortantes, que son las componentes tangenciales a dichas superficies (ver Figura 2.3) [Darby, 1976; Dealy, 1982].

El esfuerzo se define como la fuerza externa aplicada por unidad de área y, por tanto, tiene unidades de presión. Tanto fuerza como superficie son magnitudes direccionales que pueden ser representadas por sendos vectores con las tres componentes correspondientes al espacio.

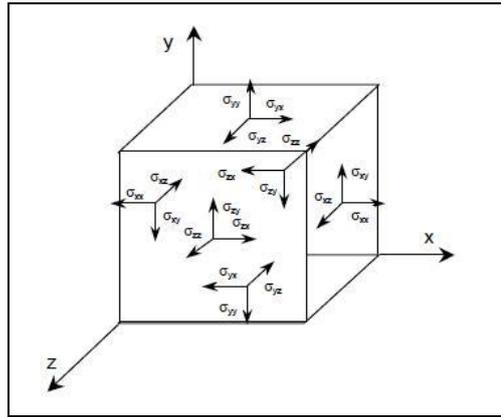


Figura 2.3. Espacio euclídeo con esfuerzos normales y de cizalla.

Por ello, para definir completamente el esfuerzo es necesario especificar nueve componentes. Es, por tanto, un tensor de segundo orden que se representa por $\bar{\sigma}_{ij}$, en su forma matricial presenta la siguiente forma [Darby, 1976]:

$$\bar{\sigma}_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{II, 1})$$

donde el primer subíndice, i , se refiere a la orientación de la cara sobre la que actúa la fuerza en el elemento material y el segundo, j , indica la dirección de la fuerza. Además, como consecuencia de la condición de equilibrio entre pares de fuerzas, el tensor es simétrico, es decir, $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$, con lo que sólo seis de las nueve componentes son independientes.

El tensor esfuerzo total ($\bar{\sigma}_{ij}$) puede descomponerse como la suma de una componente isotrópica (σ) y otra anisotrópica ($\bar{\tau}_{ij}$) [Dealy, 1982]

$$\bar{\sigma}_{ij} = \sigma \cdot \bar{\delta}_{ij} + \bar{\tau}_{ij} \quad (\text{II, 2})$$

donde $\bar{\delta}_{ij}$ es el tensor unitario o delta de Kronecker.

Los esfuerzos isotrópicos son perpendiculares a todas las superficies del material sobre las que actúan, y poseen idéntica magnitud en todas las direcciones, lo que puede ocasionar un cambio de volumen, pero nunca una alteración de la forma del material. Los esfuerzos anisotrópicos pueden actuar normal o tangencialmente a varias superficies del material, pudiendo provocar un cambio en la forma del material, pero no en su volumen. La expresión matemática de esta componente anisotrópica es el tensor esfuerzo desviatorio, $\bar{\tau}_{ij}$, que se anula cuando el material está en reposo, ya que en este estado el único esfuerzo que puede existir es la presión interna, P , que obedece la ley de la distribución hidrostática y es isotrópica.

No es posible medir directamente componentes aisladas del esfuerzo normal anisotrópico, pero sí es posible medir componentes del esfuerzo total:

$$\bar{\sigma}_{ij} = P \cdot \bar{\delta}_{ij} + \bar{\tau}_{ij} \quad (\text{II, 3})$$

Considerando diferencias de esfuerzos, es posible eliminar la contribución de la presión en las componentes del esfuerzo total:

$$\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = (-P + \tau_{xx}) - (-P + \tau_{yy}) = \tau_{xx} - \tau_{yy} \quad (\text{II, 4})$$

$$\sigma_{yy} - \sigma_{zz} = (-P + \tau_{yy}) - (-P + \tau_{zz}) = \tau_{yy} - \tau_{zz} \quad (\text{II, 5})$$

Para los materiales incompresibles, como la mayoría de los materiales de interés reológico, sólo tiene significado los esfuerzos de cizalla y las diferencias de esfuerzos normales. Un esfuerzo isotrópico no provoca cambios en el material incompresible, ya que no puede cambiar su volumen. De esta forma, las componentes del tensor esfuerzo total, $\bar{\sigma}_{ij}$, podrán sustituirse por las del tensor esfuerzo desviatorio, $\bar{\tau}_{ij}$:

$$\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = \tau_{xx} - \tau_{yy} \quad (\text{II, 6})$$

$$\sigma_{yy} - \sigma_{zz} = \tau_{yy} - \tau_{zz} \quad (\text{II, 7})$$

$$\sigma_{ij} = \tau_{ij} \text{ si } i \neq j \quad (\text{II, 8})$$

2.2.2 Tensor deformación y velocidad de deformación

La deformación, γ , y la velocidad de deformación, $\dot{\gamma}$, son las expresiones matemáticas que definen la respuesta dinámica del material al esfuerzo aplicado sobre el mismo.

Se puede considerar que una deformación tiene lugar siempre que ocurra un cambio en la separación entre dos puntos de un elemento material. Es una magnitud adimensional, ya que se expresa como el cociente entre el incremento de separación y la separación inicial entre los dos puntos. Puesto que ambas magnitudes son vectoriales, la deformación debe ser también un tensor de segundo orden, con nueve componentes. Se habla entonces de tensores deformación y velocidad de deformación.

La deformación es un tensor simétrico y puede definirse una forma isotrópica (e) y una anisotrópica ($\bar{\gamma}_{ij}$) [Dealy, 1982]:

$$\bar{e}_{ij} = e \cdot \bar{\delta}_{ij} + \bar{\gamma}_{ij} \quad (\text{II, 9})$$

Al igual que en el caso del tensor esfuerzo, la componente isótropa indica un cambio de volumen (dilatación o compresión), sin alterar la forma, mientras que la anisotrópica refleja una modificación de la forma del material, sin alteración del volumen. La expresión matemática de esta componente anisotrópica es el tensor deformación desviatorio, $\bar{\gamma}_{ij}$. Para un material incompresible, $e = 0$, resultando $\bar{e}_{ij} = \bar{\gamma}_{ij}$.

En cuanto al tensor velocidad de deformación, se obtiene directamente por derivación con respecto al tiempo del tensor deformación:

$$\bar{\dot{\gamma}}_{ij} = \frac{d(\bar{e}_{ij})}{dt} \quad (\text{II, 10})$$

2.2.3 Cizalla simple

Es el tipo de deformación generada cuando un material está comprendido entre dos placas paralelas, separadas a una distancia infinitesimal, y la placa superior es sometida a una fuerza, F , que le obliga a desplazarse linealmente una distancia x , mientras que la placa inferior se mantiene en reposo.

La aplicación de una fuerza constante provoca un desplazamiento lineal de la placa superior a velocidad constante, y una respuesta en el material en forma de deformación de cizalla simple o flujo [Schramn, 1994]. Si no existe deslizamiento sobre la superficie de las placas, cada elemento del material sufrirá una deformación (ver Figura 2.4), que viene expresada como:

$$\gamma = \frac{dx}{dy} \quad (\text{II, 11})$$

y una velocidad de deformación o velocidad de cizalla simple, $\dot{\gamma}$, definida como la variación de la deformación respecto al tiempo:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (\text{II, 12})$$

donde γ es la deformación de cizalla simple, siendo dx el desplazamiento de la superficie superior del elemento con respecto a la superficie inferior en la dirección x , y dy la altura del elemento.

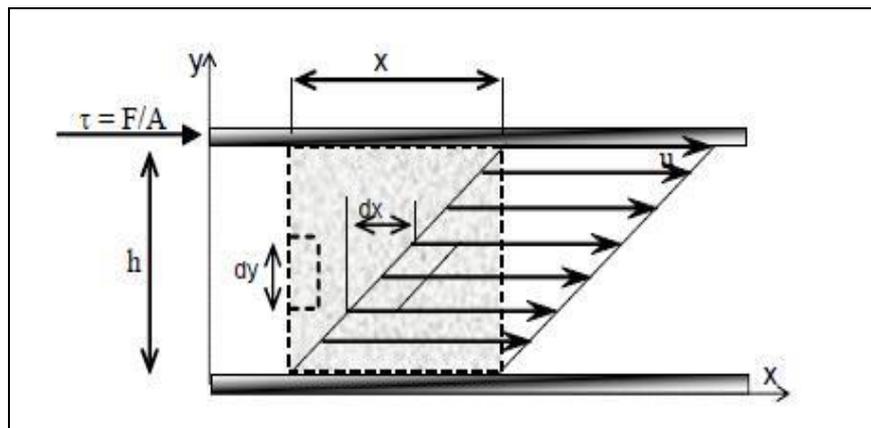


Figura 2.4. Cizalla simple entre dos placas paralelas.

Como la deformación es uniforme e independiente del tamaño del elemento, puede representarse también en función de la distancia entre placas, h , y del desplazamiento de la placa superior, x :

$$\gamma = \frac{x}{h} \quad (\text{II, 13})$$

Normalmente, para el estudio de fluidos, el material se somete a una cizalla continua, alcanzándose, en estado estacionario, una velocidad lineal constante, u . De esta forma, la velocidad de un elemento del material se expresa:

$$u = \frac{dx}{dt} \quad (\text{II, 14})$$

y la velocidad de deformación o velocidad de cizalla viene dada por:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\left(\frac{dx}{dy}\right)}{dt} = \frac{d\left(\frac{dx}{dt}\right)}{dy} = \frac{du}{dy} \quad (\text{II, 15})$$

o también como:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\left(\frac{x}{h}\right)}{dt} = \frac{d\left(\frac{dx}{dt}\right)}{h} = \frac{u}{h} \quad (\text{II, 16})$$

siendo constante a través del material.

La velocidad de deformación que puede alcanzarse para un esfuerzo aplicado, viene controlada por la resistencia interna del líquido, cuantificada por la viscosidad. Asimismo, este parámetro se puede definir como una medida de la resistencia al flujo [Macosko, 1994].

2.2.4 Caracterización reológica de un material

La caracterización reológica de un material consiste en encontrar la relación, en forma de ley matemática, que existe entre el esfuerzo aplicado y la respuesta dinámica del material [Darby, 1976]. Dicha expresión matemática puede relacionar todos los componentes del tensor esfuerzo con los del tensor deformación o velocidad de deformación, en tal caso se le conoce como ecuación constitutiva o ecuación reológica de estado, y define el comportamiento reológico más general posible. Por otro lado, dicha expresión puede relacionar sólo ciertas componentes parciales de los

tensores anteriores, por lo que constituiría una particularización de la ecuación constitutiva, denominada función del material.

Para encontrar una función del material, en el laboratorio se recurre a flujos reales que se asemejen al de cizalla simple, ya que en esta situación, tanto el esfuerzo como la deformación, se distribuyen homogéneamente a lo largo de todo el material, estando relacionados de forma sencilla con fuerzas externas y desplazamientos medibles directamente. Estos ensayos de flujo semejantes a los de cizalla simple son los denominados flujos viscosimétricos. Se define flujo viscosimétrico como una corriente estacionaria en la que la velocidad tiene una sola componente en cada punto, que además depende sólo de una variable espacial. Las geometrías entre las que se coloca el material pueden ser diversas, siendo las más comunes la cono-placa, de geometría circular, en la que la superficie superior tiene una forma cónica con un ángulo muy pequeño ($< 4^\circ$), y los cilindros coaxiales, donde el flujo se establece en el espacio comprendido entre dos cilindros concéntricos de distintos diámetros.

Para los dispositivos experimentales que posean estas características, la función del material vendrá definida mediante las componentes “xy” de igual forma que en cizalla simple. En lo sucesivo siempre que se omitan los subíndices se entenderá que las componentes implicadas se reducen a las “xy”.

2.2.5 Clasificación de los distintos comportamientos reológicos

Las teorías clásicas de la elasticidad y la hidrodinámica distinguen de forma radical entre sólidos y fluidos mediante los conceptos de sólido perfectamente elástico y, en el otro extremo, el fluido puramente viscoso [Macosko, 1994; Whorlow, 1992]:

- ✓ *Sólido elástico perfecto*: según Hooke (1678), en el sólido perfectamente elástico, la aplicación de una fuerza produce una deformación permanente proporcional al esfuerzo aplicado. Esta proporcionalidad vendrá dada por el módulo elástico del material o módulo de Young (G). Cuando esta fuerza por unidad de superficie cesa, el cuerpo recupera instantáneamente su estado inicial imperturbado.
- ✓ *Líquido viscoso puro*: según Newton (1687), si el material en consideración es un fluido de viscosidad constante, el esfuerzo aplicado es proporcional al cambio instantáneo de deformación con el tiempo o velocidad de deformación, independientemente de la deformación producida. Esta proporcionalidad viene dada por la viscosidad del material (μ).

Entre estos comportamientos extremos tenemos un gran número de materiales, definidos como materiales viscoelásticos, porque presentan características, tanto de flujo viscoso como de sólido elástico.

En el siguiente esquema (Figura 2.5) se presenta una clasificación típica de los materiales, desde un punto de vista reológico, atendiendo a la relación que existe entre el esfuerzo aplicado y la deformación o velocidad de deformación [Darby, 1976]. Una clasificación más correcta debería tener en cuenta que un material podría manifestar un comportamiento u otro dependiendo de la magnitud del esfuerzo o de la deformación así como del tiempo de cizalla previa.

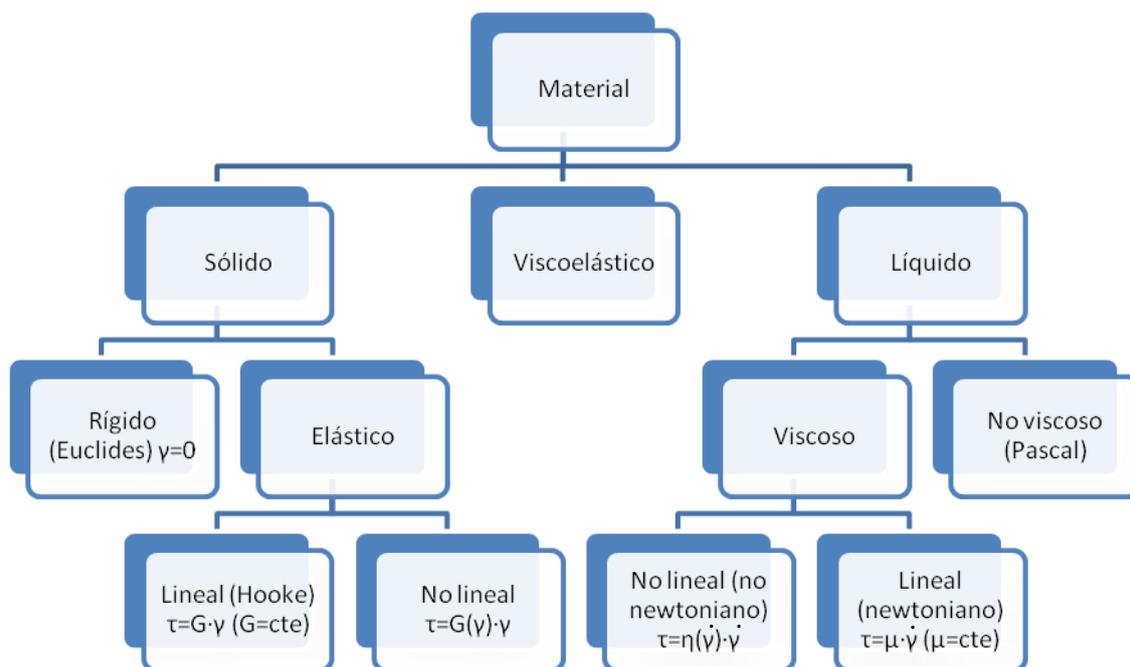


Figura 2.5. Clasificación de los materiales desde un enfoque reológico.

2.2.6 Comportamiento de flujo viscoso

En una situación de flujo estacionario, los fluidos se pueden comportar como newtonianos o no newtonianos, en función del cumplimiento de la Ley de Newton (1687). Como se ha comentado, los fluidos newtonianos son aquellos en los que los valores de esfuerzo cortante y velocidad de cizalla mantienen una relación de proporcionalidad directa. Atendiendo a la Ley de Newton de la viscosidad, dicho coeficiente de proporcionalidad, denominado viscosidad dinámica o viscosidad de Newton, μ , se define como la relación entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de deformación:

(II, 17)

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

Este parámetro es una propiedad del material, y es independiente del esfuerzo, siendo sólo función de la naturaleza del material, la presión y la temperatura. Presentan este comportamiento la mayoría de los fluidos

con estructura sencilla y compuestos por moléculas relativamente simples en una sola fase.

Sin embargo, para los fluidos no newtonianos la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de cizalla no es constante, sino que depende la magnitud de los mismos. El comportamiento de flujo viscoso de estos fluidos no puede definirse según la ecuación anterior. Aunque de forma análoga a la viscosidad de Newton, se define la viscosidad aparente para estos fluidos, η , como la relación existente entre el esfuerzo y la velocidad de deformación, para cada velocidad de cizalla:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (\text{II, 18})$$

Existe una gran variedad de fluidos no newtonianos, tales como emulsiones, suspensiones concentradas, cristales líquidos, fluidos que contienen macromoléculas, etc., los cuales se pueden clasificar en función de la dependencia con la velocidad de deformación o con el tiempo de cizalla [Macosko, 1994], aunque muchos de ellos manifiestan ambos fenómenos simultáneamente.

Los tres tipos de fluidos no ideales más comunes, dependientes de la velocidad de cizalla, son los pseudoplásticos, los dilatantes y los plásticos.

El comportamiento de flujo pseudoplástico (“shear-thinning”) es el más frecuente, exhibido por disoluciones de polímeros, emulsiones y suspensiones, etc. El origen de este fenómeno se debe a cambios en la estructura compleja de estos materiales, como consecuencia de la variación en la velocidad de deformación. Estas estructuras están distribuidas al azar manteniendo un estado altamente desordenado que origina una gran resistencia interna al flujo. La aplicación de un gradiente de velocidad de cizalla creciente genera una deformación y orientación de

las partículas que componen la estructura en la dirección del esfuerzo aplicado, lo cual se traduce en un descenso de la resistencia al flujo y, por tanto, de la viscosidad aparente.

Los fluidos dilatantes muestran un comportamiento menos frecuente que el pseudoplástico y consiste en un aumento de la viscosidad aparente al elevarse la velocidad de cizalla (“shear-thickening”). Dicho comportamiento se puede encontrar en algunas suspensiones concentradas de sólidos, proteínas y ciertas disoluciones de polímeros y detergentes.

Los materiales plásticos presentan un comportamiento viscoso caracterizado por un valor de esfuerzo cortante, definido como esfuerzo umbral, τ_0 , por debajo del cual se comporta como un sólido elástico, fluyendo cuando se supera este esfuerzo. Ello se puede asociar a la destrucción de un entramado estructural sólo cuando un esfuerzo externo aplicado supera el valor de las fuerzas atractivas que mantienen el esqueleto estructural. Los alimentos que presentan este comportamiento normalmente consisten en una red de agregados moleculares o partículas dispersas en una matriz de líquido [Clark, 1987; Edward *et al.*, 1987; Tung y Paulson, 1995]. De esta forma solo fluyen cuando el valor de la tensión externa supera el valor de las fuerzas atractivas que mantiene la red tridimensional. Se pueden citar la margarina y la mantequilla que consiste en una red de diminutos cristales de grasa dispersos en una fase líquida de aceite [Moran, 1994].

Por debajo de un cierto esfuerzo aplicado hay deformación en la muestra, pero los débiles enlaces no se rompen hasta que no supera un determinado esfuerzo. Sin embargo, el concepto de esfuerzo umbral es ciertamente polémico, ya que en principio todo material distinto a un sólido rígido puede fluir al ser sometido a un esfuerzo, siempre que el tiempo de observación sea suficiente [Barnes y Walters, 1985]. Sin

embargo, el concepto de esfuerzo umbral sigue siendo de utilidad práctica, sobre todo a nivel industrial [Barnes, 1992, 1998; Astarita, 1990].

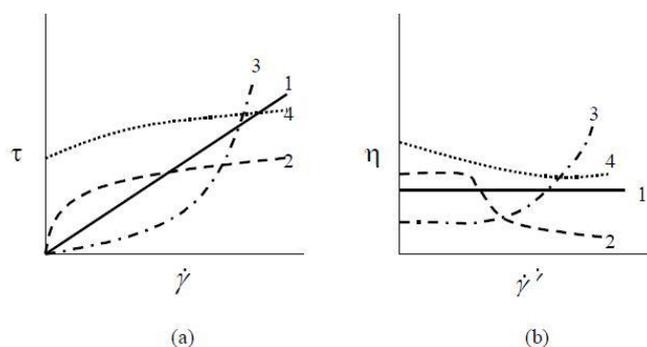


Figura 2.6. Curvas de flujo (a) y viscosidad (b) para fluidos: [1] newtonianos, [2] pseudoplásticos, [3] dilatante y [4] plástico.

2.2.7 Comportamiento dependiente del tiempo de cizalla

Cuando la estructura de un fluido necesita un período de tiempo significativo para adaptarse a cambios en la velocidad de cizalla, la viscosidad medida en un experimento de cizalla simple no varía sólo con la velocidad de cizalla, sino también con el tiempo [Quemada et al., 1984].

Hay muchos sistemas, y en concreto sistemas alimentarios cuya viscosidad aparente depende no sólo de la velocidad de deformación sino también del tiempo en el que el esfuerzo fue aplicado [Quemada et al., 1984]:

$$\eta = \eta(\dot{\gamma}, t) \quad (\text{II}, 19)$$

Los fluidos no newtonianos con propiedades dependientes del tiempo se subdividen en fluidos tixotrópicos y reopécticos.

El fluido se denomina tixotrópico cuando, a velocidad de cizalla constante, la viscosidad aparente desciende con el tiempo, y

antitixotrópico o reopéctico cuando lo que se produce es un aumento de viscosidad con el tiempo [Groves y Ahmad, 1976].

La tixotropía es un fenómeno reversible en el que la viscosidad disminuye con el tiempo de cizalla, pero al cesar la cizalla, la viscosidad recupera su valor inicial (Groves y Ahmad, 1976). Este comportamiento indica una ruptura o reorganización de la estructura dando como resultado una disminución de la resistencia al flujo [Rha, 1978].

Muchos alimentos tienen un comportamiento de flujo dependiente del tiempo pero su período de recuperación es muy largo o su estructura sólo es parcialmente recuperable. Por ello, en estos casos, es más adecuado utilizar el término “destrucción estructural” [Gallegos *et al.*, 1988].

Los fluidos reopécticos exhiben un comportamiento contrario a los tixotrópicos. Aunque se ha observado un comportamiento reopéctico en algunos alimentos, como ciertas mieles de eucalipto, este tipo de fluidos son muy poco frecuentes en el campo de la alimentación.

2.2.8 Comportamiento viscoelástico

Los materiales viscoelásticos presentan un comportamiento viscoso y elástico simultáneamente. En un material elástico lineal o sólido de Hooke, toda la energía mecánica aplicada al material es almacenada y, posteriormente, recuperada como energía mecánica una vez se retira la fuerza aplicada (no hay pérdidas de energía). Por otro lado, en un material puramente viscoso, toda la energía es disipada en forma de calor.

El estudio de la viscoelasticidad implica establecer relaciones entre el esfuerzo, la deformación y el tiempo. En este tipo de comportamiento se deben distinguir dos situaciones diferentes. En el caso en que tanto el esfuerzo como la deformación sean relativamente pequeños, de manera

que la estructura del material se conserva en estado prácticamente imperturbado, las relaciones entre ambas magnitudes y el tiempo se pueden describir mediante ecuaciones diferenciales lineales de coeficientes constantes y el comportamiento se denomina viscoelástico lineal. Esto implica que la relación entre la deformación y el esfuerzo es sólo función del tiempo y no de la magnitud del esfuerzo [Darby, 1976; Dealy, 1982]. En el caso contrario, en el que la cizalla aplicada sea suficientemente elevada como para producir destrucción estructural, a dicho comportamiento se le denominará viscoelástico no lineal.

Los criterios para caracterizar los materiales viscoelásticos son relativos, y dependen del tiempo característico requerido por el material para responder a un cambio en el esfuerzo o la deformación en comparación con la escala de tiempo de observación, además de la magnitud del esfuerzo o de la deformación. Esta escala de tiempo se cuantifica a través del número de Deborah [Reiner, 1960]; cuando $D_N \rightarrow 0$, los materiales tienen un comportamiento puramente viscoso, mientras que cuando $D_N \rightarrow \infty$ se comportan como sólidos, siendo la definición más común de este parámetro:

$$D_N = \frac{\textit{Tiempo de relajación característico del material}}{\textit{Tiempo de observación}} \quad (\text{II, 20})$$

El estudio del comportamiento viscoelástico lineal es especialmente útil a la hora de obtener información sobre la microestructura del material [Ferry, 1980], estudiar el comportamiento de un material durante su almacenamiento, detectar posibles separaciones de componentes, etc.

Un material viscoelástico puede ser caracterizado por ciertas funciones respuesta de éste, ante la aplicación de determinadas condiciones experimentales.

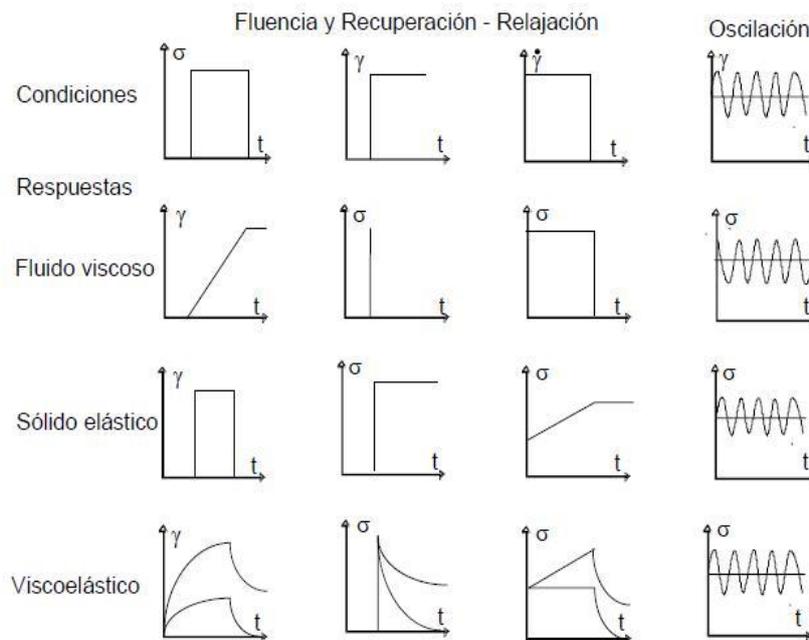


Figura 2.7. Respuesta característica de los distintos tipos de materiales.

Los ensayos más utilizados para caracterizar las propiedades reológicas de materiales viscoelásticos son los de fluencia (“creep”) y recuperación, relajación del esfuerzo y oscilatorios [Whorlow, 1992]. En la Figura 2.7 pueden observarse comparativamente las respuestas características de materiales viscosos lineales, elásticos lineales y viscoelásticos lineales en estos ensayos reológicos.

2.2.8.1. Ensayos de fluencia (“creep”) y recuperación

Consiste en aplicar un esfuerzo constante a tiempo cero, σ , y medir la deformación resultante en función del tiempo. Los ensayos de fluencia suelen ir acompañado de un ensayo de recuperación, a través del cual se estudia la respuesta del material tras el cese del esfuerzo de cizalla [Schramn, 1994]. La función respuesta que se define en este ensayo es la capacitancia lineal, $J(t)$:

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma}$$

Los sólidos elásticos perfectos alcanzan rápidamente una situación en la que $J(t)$ deja de variar con el tiempo. Este valor constante se define como capacitancia de equilibrio, J_e , y es característico de cada material. Los líquidos viscosos puros dan lugar a una función lineal creciente cuya pendiente es la inversa de la viscosidad dinámica. Los materiales viscoelásticos presentan un comportamiento intermedio, cuadrático, a tiempos pequeños, y lineal, a tiempos altos.

2.2.8.2 Ensayos de relajación del esfuerzo

En este tipo de experimento se aplica una deformación constante sobre el material y se mide la variación del esfuerzo resultante en función del tiempo. La función característica del material que se define es el módulo de relajación lineal, $G(t)$:

$$G(t) = \frac{\sigma(t)}{\gamma} \quad (\text{II, 22})$$

En el caso de un sólido elástico perfecto se alcanza una situación de equilibrio, que permite definir el módulo de rigidez de equilibrio, G_e , mientras que, en el caso de líquidos viscosos puros, el material relaja rápidamente a valores de esfuerzo nulos. De nuevo, los materiales viscoelásticos presentan un comportamiento intermedio [Schramn, 1994].

2.2.8.3 Ensayos dinámicos de cizalla oscilatoria

Las medidas dinámicas proporcionan un método prácticamente no destructivo para determinar el carácter viscoelástico de un material [Elliot

y Ganz, 1977]. Se basan en la aplicación de un esfuerzo cortante o deformación por cizalla que varía de forma sinusoidal con el tiempo.

Desde un punto de vista práctico, el movimiento oscilatorio se genera en reómetros rotatorios convencionales, haciendo que el rotor no gire continuamente en una dirección sino que se desplace un pequeño ángulo, en el sentido de las agujas del reloj y en el contrario, siguiendo una función sinusoidal del tiempo [Schramm, 1994].

La deformación por cizalla aplicada sobre el material se puede expresar en función del tiempo según:

$$\gamma = \gamma_0 \text{sen}\omega t \quad (\text{II, 23})$$

siendo γ la deformación por cizalla, γ_0 la deformación por cizalla amplitud de la onda correspondiente al movimiento armónico simple, ω la frecuencia y t el tiempo de aplicación del ensayo.

La velocidad de deformación por cizalla es también una función periódica:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \gamma_0 \omega \text{cos}\omega t = \dot{\gamma}_0 \text{cos}\omega t \quad (\text{II, 24})$$

Un material sometido a una deformación sinusoidal pequeña, que garantice una respuesta viscoelástica lineal, responde tras un cierto número de ciclos con un esfuerzo de cizalla que sigue también una función sinusoidal respecto al tiempo, pero con una amplitud característica de la naturaleza de dicho material [Schramm, 1994].

Si el material se comportara como un sólido ideal, la respuesta sería puramente elástica por lo que el esfuerzo de cizalla dependería linealmente de la deformación ($\sigma = G\gamma$; G es el módulo de cizalla), por lo que el desfase sería cero:

$$\sigma = G\gamma_0 \operatorname{sen}\omega t \quad (\text{II, 25})$$

Si el material fuera un fluido ideal viscoso, se cumpliría la ley de Newton ($\sigma = \eta[dy/dt]$) por lo que la onda correspondiente al esfuerzo de cizalla estaría desfasada 90° respecto a la onda de deformación de cizalla:

$$\sigma = \eta\gamma_0 \omega \operatorname{cos}\omega t = \sigma_0 \operatorname{cos}\omega t = \sigma_0 \operatorname{sen}(\omega t + 90) \quad (\text{II, 26})$$

Un material viscoelástico muestra un comportamiento intermedio entre el viscoso y el elástico puro, de ahí que la onda del esfuerzo de cizalla presente un ángulo de desfase respecto a la onda de deformación, comprendido entre 0° y 90° . El esfuerzo de cizalla se puede expresar matemáticamente como:

$$\sigma = \sigma_0 \operatorname{sen}(\omega t + \delta) \quad (\text{II, 27})$$

Donde σ_0 es la amplitud de la onda correspondiente al esfuerzo de cizalla (máximo valor del mismo) y δ el ángulo de desfase respecto a la onda de deformación, en ocasiones denominado “ángulo de pérdidas mecánicas” [Dealy, 1982].

Si se desarrolla trigonómicamente la expresión del esfuerzo de cizalla para un material viscoelástico se tiene que:

$$\sigma = \sigma_0(\operatorname{sen}\omega t \operatorname{cos}\delta + \operatorname{sen}\delta \operatorname{cos}\omega t) \quad (\text{II, 28})$$

Un análisis de la ecuación anterior sugiere que la onda correspondiente al esfuerzo de cizalla se puede descomponer en dos ondas de la misma frecuencia, una en fase con la onda de la deformación por cizalla ($\operatorname{sen}\omega t$) y otra con un desfase de 90° ($\operatorname{cos}\omega t$). De esta forma, esta ecuación se puede presentar de la siguiente forma:

$$\sigma = \sigma' + \sigma'' = \sigma'_0 \operatorname{sen}\omega t + \sigma''_0 \operatorname{cos}\omega t \quad (\text{II, 29})$$

De donde se deduce que:

$$\sigma'_0 = \sigma_0 \operatorname{cos}\delta \quad (\text{II, 30})$$

$$\sigma''_0 = \sigma_0 \operatorname{sen}\delta \quad (\text{II, 31})$$

Esta descomposición permite la definición de los componentes G' y G'' :

$$G' = \left(\frac{\sigma'_0}{\gamma_0}\right) = \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0}\right) \operatorname{cos}\delta \quad (\text{II, 32})$$

$$G'' = \left(\frac{\sigma''_0}{\gamma_0}\right) = \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0}\right) \operatorname{sen}\delta \quad (\text{II, 33})$$

G' es la componente en fase con la onda de la deformación, representa el carácter elástico del material y es llamada módulo de almacenamiento. La componente en desfase, G'' , representa el carácter viscoso y se denomina módulo de pérdidas [Forster y Kolfenbach, 1958].

De hecho, G' es directamente proporcional a la energía media almacenada en un ciclo de deformación por unidad de volumen y G'' lo es a la energía disipada en un ciclo de deformación por unidad de volumen [Macosko, 1994].

Las ecuaciones anteriores sugieren que G' y G'' se pueden analizar como las componentes real e imaginaria de un número complejo, que se denomina módulo complejo, G^* , y cuya forma trigonométrica sería:

$$G^* = \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0}\right) \operatorname{cos}\delta + i \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0}\right) \operatorname{sen}\delta = G' + iG'' \quad (\text{II, 34})$$

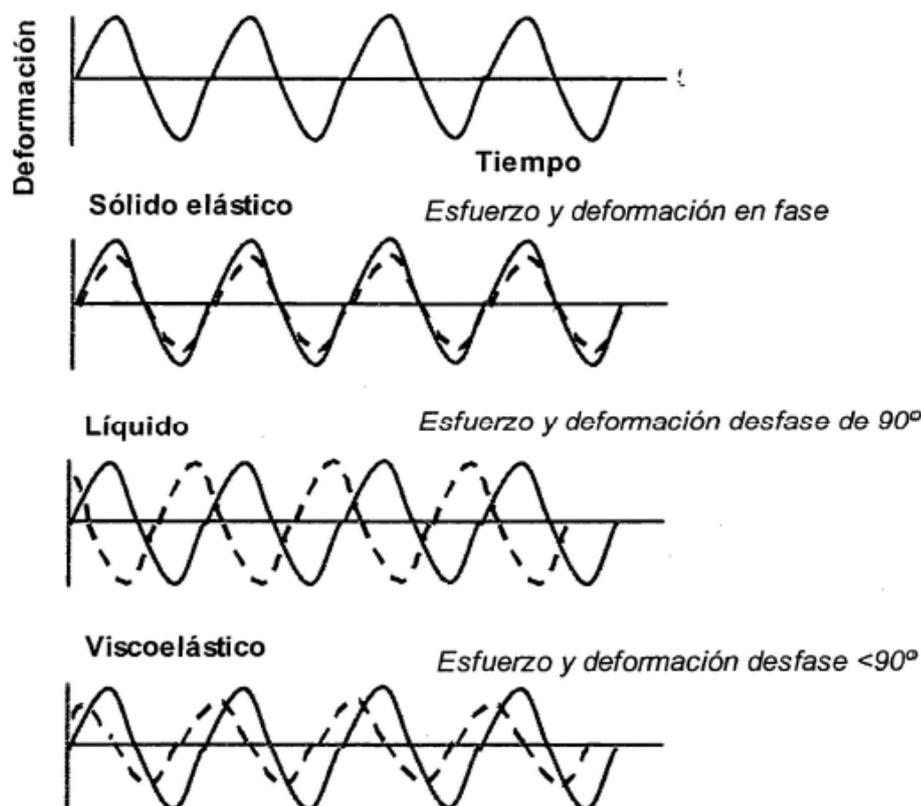


Figura 2.8. Ensayos dinámicos en un reómetro de deformación controlada para un sólido ideal, un fluido ideal y un material viscoelástico.

El módulo del número complejo G^* sería:

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \quad (\text{II, 35})$$

Por otro lado, se deduce que:

$$\text{tg } \delta = \left(\frac{G''}{G'} \right) \quad (\text{II, 36})$$

La tangente del ángulo de desfase, también denominada tangente de pérdidas, es una función viscoelástica dinámica, generalmente dependiente de la frecuencia, que expresa la relación entre las componentes viscosa y elástica. Así, el valor 1 de la tangente de pérdidas

indica que en estas condiciones el material responde con componentes viscosa y elástica del mismo valor.

Otra función viscoelástica de interés en la caracterización de materiales es la viscosidad compleja η^* .

Esta metodología suele ser más adecuada para materiales viscoelásticos de carácter predominantemente fluido. Se puede definir una viscosidad dinámica en función de la componente del esfuerzo desfasada respecto a la onda de la deformación por cizalla, σ''_0 , que está relacionada con la componente viscosa de la respuesta viscoelástica, G'' :

$$\eta' = \frac{\sigma''_0}{\dot{\gamma}_0} = \frac{\sigma_0 \operatorname{sen} \delta}{\gamma_0 \omega} = \frac{G''}{\omega} \quad (\text{II, 37})$$

Además, se puede definir una componente de la viscosidad compleja en función de σ'_0 , es decir, relacionada con G' :

$$\eta'' = \frac{\sigma'_0}{\dot{\gamma}_0} = \frac{\sigma_0 \operatorname{cos} \delta}{\gamma_0 \omega} = \frac{G'}{\omega} \quad (\text{II, 38})$$

Por tanto, η' y η'' son las componentes del número complejo η^* , denominado viscosidad compleja, cuyo módulo es:

$$|\eta^*| = \sqrt{\eta'^2 + \eta''^2} = \sqrt{\left(\frac{G''}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{G'}{\omega}\right)^2} = \frac{|G^*|}{\omega} \quad (\text{II, 39})$$

Un sólido elástico perfecto se caracteriza por un ángulo de desfase δ nulo, lo cual implicaría que:

$$G' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0}; \quad G'' = 0; \quad \eta' = 0 \quad (\text{II, 40})$$

Un líquido viscoso ideal se caracteriza por un ángulo de desfase de 90° , por tanto:

$$G' = 0; \quad G'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0}; \quad \eta' = \frac{\sigma_0}{\dot{\gamma}_0} \quad (\text{II, 41})$$

En la Figura 2.9 se muestra, un espectro mecánico completo característico de un material viscoelástico, al aplicar el principio de superposición tiempo-temperatura [Ferry, 1980].

Se observa que en la zona de bajas frecuencias o región de flujo terminal, por debajo del punto de corte entre las funciones viscoelásticas G' y G'' , el material presenta un comportamiento típico de líquido ($G'' > G'$) con variaciones potenciales de ambos módulos con la frecuencia, caracterizadas por pendientes 2 y 1, respectivamente, en escalas logarítmicas.

En la zona de frecuencias intermedias, denominada zona o región “plateau”, la respuesta es predominantemente elástica, siendo el módulo de almacenamiento superior al de pérdidas ($G' > G''$). En esta región se establece el módulo “plateau”, G_N^0 , el cual se define como una extrapolación de la contribución del grado de entrelazamientos sobre G' a altas frecuencias [Baumgaertel et al., 1992].

Según Almdal et al. (1993), la caracterización de geles se debe de realizar a través de las propiedades mecánicas dinámicas, de tal manera que este tipo de materiales muestran un módulo de almacenamiento, $G'(\omega)$, con una pronunciada zona “plateau” que se extiende en el tiempo al menos en el orden de segundos y un módulo de pérdidas, $G''(\omega)$, considerablemente menor que el módulo de almacenamiento en la región “plateau”.

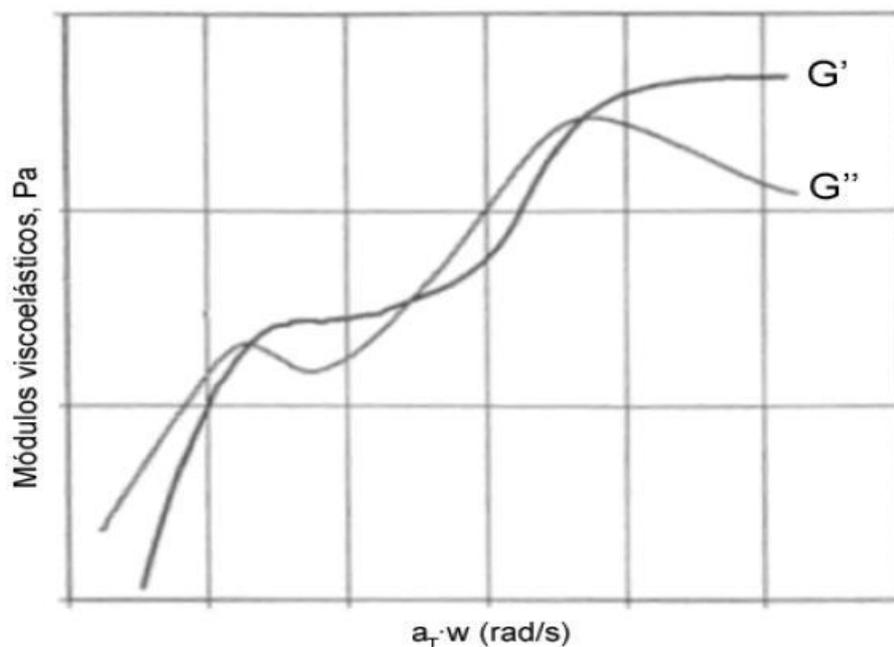


Figura 2.9. Espectro mecánico completo de un polímero de alto peso molecular no reticulado.

En la zona de altas frecuencias se encuentra la región de transición vítrea donde de nuevo $G'' > G'$, y finalmente, la región vítrea, donde el material se comporta como un sólido, mostrando un valor de G' elevado e independiente de la frecuencia.

La obtención del espectro mecánico completo sólo es posible si el intervalo de frecuencias estudiado es lo suficientemente amplio y el material permite la aplicación del principio de superposición tiempo-temperatura.

Si un material es termo-reológicamente simple se puede generalizar el comportamiento de una función viscoelástica lineal, aplicando el principio de superposición tiempo-temperatura.

Este principio permite obtener una curva maestra de la función viscoelástica estudiada. Según este principio, se demuestra que cualquier

función viscoelástica lineal medida en función de la frecuencia, a una temperatura T, difiere de la misma función, a temperatura T₀ de referencia, en un factor constante en la escala de frecuencia.

Dicho factor a_T se denomina factor de superposición, y debe ser obtenido midiendo la cantidad de desplazamiento a lo largo del eje x necesario para superponer las curvas.

Dicho parámetro a_T vale la unidad a la temperatura de referencia. La dependencia con la temperatura del factor de superposición se puede expresar de forma analítica como:

WLF (T_g<T<T_g+100):

$$\log a_T = \frac{-C_1(T-T_0)}{C_2+T-T_0} \quad (\text{II, 42})$$

donde C₁, C₂ son constantes y T₀ es la temperatura de referencia elegida.

Ecuación Arrhenius (T>T_g+100):

$$\ln a_T = \ln A + \frac{E_a}{R \cdot T} \quad (\text{II, 43})$$

donde A es una constante, E_a es la energía de activación y R es la constante de los gases.

2.3 Reología de alimentos derivados de frutas y hortalizas

2.3.1 Generalidades sobre Reología de alimentos

La Reología de los alimentos estudia la deformación y flujo de los materiales frescos, productos intermedios y productos finales de la industria alimentaria, así como el proceso de masticación e ingestión de

alimentos, lo cual implica someter al alimento a una serie de deformaciones y flujos con el fin de descomponer su estructura en una forma más adecuada para su ingestión y posterior digestión [White, 1970].

Sin embargo, esta ciencia, es aún muy joven, bastante experimental y de escaso soporte teórico, debido a la complejidad de los sistemas alimentarios, siendo difícil la interpretación de los datos reológicos, pese a lo cual el impacto de los métodos reológicos es ya bien reconocido en la industria agroalimentaria, probando así la necesidad urgente de datos reológicos de diferentes materias primas y productos derivados.

El análisis y la cuantificación del comportamiento reológico de los alimentos y la investigación de las causas químicas y estructurales que lo determinan, tienen un gran interés en la ciencia de los alimentos para establecer relaciones entre la estructura y el flujo, así como de otros parámetros físicos [Resch, 2002; Abu-Jdayil, 2004].

Además, la importancia del conocimiento reológico es también económica y comercial. Los efectos del transporte y manipulación contra la integridad física de alimentos frescos o cocinados, su comportamiento durante los procesos de elaboración y la calidad textural dependerán de su respuesta cuando se apliquen fuerzas externas [Ibarz y Barboza, 2005], así como de la velocidad de deformación o del esfuerzo de cizalla y de la historia previa de cizalla [Tiu y Boger, 1974].

Es importante el conocimiento adecuado de las propiedades reológicas de los alimentos por numerosas razones, entre las que destacan las siguientes:

- ✓ Diseño de procesos y equipos en ingeniería: el conocimiento de las propiedades de los alimentos son imprescindibles en el diseño y dimensionado de equipos tales como cintas transportadoras, tuberías, tanques de almacenamiento, pulverizadores o bombas para

el manejo de alimentos [Odigboh y Mohsenin, 1975; Boger y Tiu, 1974; Gorbatov y Gorbatov, 1974]. Además, la viscosidad se utiliza para la estimación y cálculo de los fenómenos de transporte de cantidad de movimiento, calor y energía [Jiménez *et al.*, 1987; Gekas, 1992; Saravacos, 1995]. El estudio reológico permite la obtención de ecuaciones que describen el comportamiento de flujo. Dichas ecuaciones se aplican a la ingeniería de procesos, sobre todo en operaciones que implican transferencia de calor y cantidad de movimiento, y que van a tener una gran relevancia para un correcto diseño de cada instalación y un funcionamiento óptimo de los procesos desarrollados en la industria [Ibarz y Barbosa, 2005].

- ✓ Evaluación sensorial: los datos reológicos pueden ser muy interesantes para modificar el proceso de elaboración o la formulación de un producto final de forma que los parámetros de textura del alimento se encuentren dentro del rango considerado deseable por los consumidores [Shama y Sherman, 1973; Rao *et al.*, 1977; Kokini, 1985].
- ✓ Obtener información sobre la estructura del alimento: los estudios reológicos pueden aportarnos información que facilite una mejor comprensión de la estructura o de la distribución de los componentes macromoleculares, así como para predecir los cambios estructurales durante los procesos de acondicionamiento y elaboración a los que son sometidos [Borwankar *et al.*, 1992; Sherman, 1970].
- ✓ Control de calidad: las medidas de la viscosidad en continuo son cada vez más importantes en muchas industrias alimentarias con objeto de controlar el buen funcionamiento del proceso productivo, así como la calidad de las materias primas, productos intermedios y acabados [Bourne, 1992].

Los alimentos se presentan en una gran variedad de formas, tales como sólidos, líquidos y semilíquidos. Algunos alimentos, entre los que se encuentran los helados y las grasas, son sólidos a una temperatura y líquidos a otra. Otros son suspensiones (mermeladas, zumos, purés o cremogenados), o emulsiones.

Numerosos estudios reológicos realizados en alimentos que se encuentran en la bibliografía confirman la gran diversidad de comportamientos de flujo que pueden presentar. Todo ello hace necesario un análisis bajo una variedad de condiciones de flujo y establecer las relaciones entre la estructura y el comportamiento de flujo [Barbosa-Canovas *et al.*, 1993].

Cuando se trabaja con sistemas simples constituidos por átomos o moléculas mono o diatómicas, pequeñas y esféricas, se puede aplicar la teoría molecular de la viscosidad, la cual señala que los parámetros que contribuyen a la viscosidad son el volumen molecular, la masa molecular, la distancia entre moléculas, la distribución radial de las moléculas, y las fuerzas de atracción entre las moléculas [Bondi, 1956].

Cuando las moléculas son complejas, caso de los alimentos, se hace necesario tener en consideración toda una serie de parámetros adicionales, tales como factores geométricos de interacción entre partículas y relación de fases.

El tamaño o volumen, la forma, la concentración y la interacción de las partículas son parámetros básicos que afectan a las propiedades reológicas de cualquier sistema, sea éste una pasta o un gel.

Sin embargo, cada uno de estos parámetros básicos es diferente para cada uno de los sistemas. De hecho, no son estos parámetros por sí mismos los que controlan las propiedades de flujo, sino las interacciones

entre ellos [Rha, 1978], que relacionan el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación.

Tabla 2.2 Constantes fundamentales para diferentes tipos de fluidos [Rha, 1978].

Tipo de fluido	Índice de consistencia	Índice de flujo	Esfuerzo umbral	Ejemplo
Newtoniano	Viscosidad $K > 0$	$n = 1$	$\tau_0 = 0$	Zumos clarificados, aceites, leche, jarabes de pastelería
Pseudoplástico	Viscosidad aparente $K > 0$	$0 < n < 1$	$\tau_0 = 0$	Zumos concentrados cremogenados y purés, de frutas, almidón
Plástico de Bingham	Plasticidad constante $K > 0$	$n = 1$	$\tau_0 > 0$	Aderezos de ensalada, salsa de dulce de chocolate, kepchup
Tipo mixto (Herschel-Bulkley)	Índice de consistencia $K > 0$	$0 < n < 1$	$\tau_0 > 0$	Mermelada, jalea
Dilatante	Índice de consistencia $K > 0$	$1 < n < \infty$	$\tau_0 = 0$	Mantequilla de maní, pasta de salchichas

Existe una gran diversidad de ecuaciones para modelizar dicha relación, pero son varios los autores [Kokini, 1992; Rha, 1978] que coinciden en que los modelos más comúnmente usados y de aplicación general para ajustar los datos experimentales y expresar cuantitativamente el comportamiento de flujo de alimentos son el de la ley de la potencia o de Ostwald-de-Waele y el de Herschel-Bulkley.

Uno de los modelos más utilizados para describir el flujo de los derivados de frutas es la ley de la potencia o de Ostwald-de-Waele:

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{II, 44})$$

Donde τ es el esfuerzo cortante, $\dot{\gamma}$ es el gradiente de deformación, k es el índice de consistencia de flujo y n es el índice de flujo, k nos da una idea de la consistencia del producto y n de la desviación del comportamiento de flujo respecto al newtoniano [Carbonell et al., 1990].

Otro de los modelos más comúnmente usados y de aplicación general para ajustar los datos experimentales y expresar cuantitativamente el comportamiento de flujo de los fluidos inelásticos independientes del tiempo es el modelo propuesto por Herschel-Bulkley:

$$\tau = \tau_0 + K_H \dot{\gamma}^n \quad (\text{II, 45})$$

donde:

- τ = esfuerzo cortante
- τ_0 = umbral de fluencia
- K_H = índice de consistencia

$\dot{\gamma}$ = velocidad de deformación

n = índice de flujo

Esta ecuación puede representar, dependiendo de los valores que tomen las constantes, diversos comportamientos de flujo de fluidos alimentarios. En la Tabla 2.2 se muestran los diferentes comportamientos de flujo, los valores de los parámetros y algunos ejemplos de alimentos que pueden describirse con cada modelo.

2.3.2 Comportamiento fluidodinámico de alimentos derivados de frutas y hortalizas

El comportamiento fluidodinámico de frutas y hortalizas ha sido estudiado por un gran número de autores. Una gran parte de las frutas y hortalizas se destinan a la elaboración de productos en conserva y de jugos o zumos concentrados también llamados pulpas concentradas, en el caso de frutas con alto contenido de sólidos en suspensión, para su posterior uso en alimentos líquidos y semilíquidos.

Tiene gran interés el estudio de los productos elaborados de frutas, cuya materia prima básica es la pulpa de la fruta, el cual se utiliza para aplicaciones en operaciones unitarias como proyectos de bombas, intercambiadores de calor y tanques de mezclado. Para que este tipo de procesos industriales sean técnica y económicamente viables, es importante tener conocimiento de las propiedades fisico-químicas y reológicas de los alimentos. Estas propiedades reológicas también son importantes como parámetros de control de calidad en los productos finales [Yeow, *et al.*, 2002].

Los jugos o pulpas concentradas presentan una serie de ventajas respecto a la misma fruta de la que se obtuvieron, pese a que pueden sufrir ligeros cambios en sus propiedades organolépticas, los que se

reducen a un mínimo, gracias a los modernos equipos de concentración y de recuperación de aromas.

En la elaboración de jugos, néctares, batidos, conservas, compotas, mermeladas, cremogenados o yogures, se requiere encontrar la mezcla óptima de ingredientes que permita generar un nuevo producto cuya formulación ofrezca características de producto funcional con alto valor nutricional y en las que se mantengan propiedades organolépticas de aroma y sabor deseables [Muteki, *et al.*, 2007].

El comportamiento reológico de zumos vegetales está influenciado por su composición, y en consecuencia, dependerá tanto de la naturaleza de la fruta con que se elaboran, como de los tratamientos que se hayan realizado en sus procesos de elaboración. Lo expuesto, pone de manifiesto la importancia de conocer la evolución de las propiedades de flujo de estos alimentos líquidos o semilíquidos durante los procesos de concentración y bombeo en instalaciones industriales, además de otras operaciones, como el tamizado, desairado, mezclado y tratamientos térmicos diversos, entre otros [Smith, 2011].

Un número limitado de alimentos muestran características de flujo newtoniano, entre los que se encuentran algunos tan importantes fisiológicamente como el agua o como las bebidas refrescantes [Perry y Chilton, 1982; Steffe *et al.*, 1996]. En la bibliografía, son también muy numerosas las citas que consideran el comportamiento newtoniano de los zumos clarificados y despectinizados de diversas frutas en un rango amplio de temperaturas y concentraciones de sólidos solubles [Saravacos, 1970; Rao *et al.*, 1984; Schwartz y Costell, 1989; Ibarz *et al.*, 1993; Khalil *et al.*, 1989].

Se ha determinado el comportamiento reológico de jugo industrializado de acerola [Silva *et al.*, 2005], con concentraciones de sólidos solubles de 4 a 16 °Brix y un intervalo de temperatura de 5 a 85

°C. Los autores encontraron que el jugo mostró un comportamiento pseudoplástico, y la viscosidad aparente disminuyó con la disminución del contenido en sólidos solubles y el aumento de la temperatura.

Se ha aplicado la metodología de superficie de respuesta para estudiar el efecto de la temperatura sobre el comportamiento reológico de las mezclas ternarias de pulpa de mango, jugos de naranja y zanahoria, con temperaturas de 10 a 60 °C [Branco y Gasparetto, 2003]. El modelo Ostwald-de-Waele se empleó para ajustar el comportamiento reológico. Continuando con esta labor, Gasparetto y White (2005) estudiaron el comportamiento de la mezcla a 60 °C, usando el modelo de Casson. El esfuerzo umbral y la viscosidad de Casson aumentaron con la fracción de mango y se redujeron con el aumento de la fracción de zumo de naranja y zanahoria.

Se ha evaluado el efecto de la temperatura y la concentración de sólidos sobre la viscosidad de jugos concentrados de granada y pera en un rango de 20 a 90 °C a 40 °Brix y de 25 a 90 °C a 30 °Brix, respectivamente [Maguerramov *et al.*, 2007] y se observó una disminución de la viscosidad con el aumento de la temperatura y un incremento con el aumento de la concentración de sólidos.

El efecto de la temperatura (10-55 °C) y la concentración (12 °Brix y 32 °Brix) en la reología de purés de melocotón homogeneizados, fue estudiado por [Torales *et al.*, 2006], concluyendo que el modelo de la ley de la potencia describe adecuadamente el comportamiento reológico del fluido.

Para describir el comportamiento reológico del puré de arándano ha sido utilizado el modelo de Sisko [Nindo *et al.*, 1987].

Jugos concentrados y purés de frutas con valores altos de sólidos solubles, han sido bien descritos por el modelo de Herschel-Bulkley, como

es el caso del puré de banano [Ditchfield *et al.*, 2004], puré de papaya [Ahmed y Ramwami., 2004].

Otro modelo utilizado es el de Casson. El modelo de Casson ha sido aplicado a una amplia gama de productos alimentarios tales como purés de frutas, gomas [Holdsworth, 1993] y pasta de dátiles [Razavi, 2012]. El modelo de Casson se ha utilizado frecuentemente para estimar el esfuerzo umbral en alimentos, estudiando los concentrados de tomate, Vitali y Rao (1984) y Rao *et al.* (1981) mostraron que el modelo de Casson no se ajusta a los datos experimentales a bajas velocidades de deformación, mientras que Vitali y Rao (1982) encontraron un buen ajuste del modelo de Casson a los datos experimentales de puré de guayaba. El modelo de Casson ha sido utilizado para describir el comportamiento de la pulpa de mango integral, filtrada y centrifugada [Vidal, 1996].

Entre los alimentos típicamente plásticos se encuentran el puré de patata [Muller, 1973]. Algunos autores han usado el modelo de Bingham para describir el comportamiento reológico de pastas de fécula de mandioca [Odigboh, 1975], suero de puré de albaricoque, [Costell *et al.*, 1982], pectinas [Fiszman *et al.*, 1984], de algunos zumos naturales de manzana [Ibarz y Casero, 1993], ketchup y mostaza francesa [Higgs y Norrington, 1971].

El número de fluidos que siguen el comportamiento dilatante es reducido, siendo característico de suspensiones, con alto contenido en sólidos, de almidón, goma arábica y de ciertos tipos de mieles de eucalipto [Hermida, 2000].

Igualmente, es importante la dependencia del tiempo en las características reológicas de los alimentos, ya que establece la relación entre la estructura y el flujo [Figoni y Shoemaker, 1983]. Sistemas alimentarios que muestran esta dependencia son las mezclas de gomas de algarrobo y xantana [Cuvelier *et al.*, 1987], la pulpa de mango

[Bhattacharya, 1999], la pasta de chile y soya caliente [Yoo, 2002] y los helados [Kus *et al.*, 2005].

2.3.2.1 Factores que influyen en el comportamiento de flujo

Existen muchos factores que influyen en el comportamiento reológico de los alimentos, los más importantes son la temperatura y la concentración de sólidos.

2.3.2.1.1 Efecto de la temperatura

Hasta el momento en que son consumidos, los alimentos están sometidos continuamente a cambios de temperatura, así mismo en el proceso de elaboración y pasando por los periodos de transporte, las condiciones de temperatura a que son sometidos los alimentos pueden variar notablemente [Hernández, 2002].

El conocimiento de la influencia de la temperatura sobre la viscosidad es esencial para proporcionar un mejor conocimiento del comportamiento reológico de derivados de frutas y vegetales durante el procesado a temperaturas elevadas [Ibarz *et al.*, 1996].

En el procesado de puré de batata se generan variaciones substanciales de la temperatura que provocan un efecto muy significativo, tanto en el comportamiento de flujo como en las propiedades sensoriales del producto [Troung y Walter, 1994].

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad de fluidos alimentarios a una velocidad de cizalla constante puede ser descrito por la ecuación de Arrhenius [Rao y Tattiyakul, 1999], en la que la viscosidad aparente disminuye de forma exponencial con el aumento de la temperatura.

Existen numerosas publicaciones sobre las propiedades de flujo de concentrados de zumo, y de los efectos de la temperatura y la concentración en las mismas [Rao, 1977].

Se ha observado el efecto de la temperatura en la disminución de la viscosidad en jugos de melocotón [Ibarz et al, 1992], e n zumo clarificado de pera [Ibarz, 1989], en jugos concentrados de kiwi [Ibarz *et al.*, 1995], siendo dicha tendencia más pronunciada a mayor concentración de sólidos en los jugos de frutas.

Como se ha estudiado en diferentes tipos de mermeladas de frutas, la viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura [Javanmard, 2010], habiendo sido analizado el comportamiento reológico a diferentes temperaturas, en mermeladas de frambuesa, fresa, ciruela, durazno y albaricoque [Alvarez, *et al.*, 2006].

En sistemas alimentarios, la ecuación de Arrhenius también puede emplearse para relacionar el índice de consistencia con la temperatura, como se describe para concentrados de tomate [Harper El-Sahrigi, 1965]; cremogenados de pera [Harper y Lebermann, 1962], puré de guayaba [Vitali y Rao, 1982].

$$K = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{II, 46})$$

donde E_a es la energía de activación, R es la constante universal de los gases perfectos, T es la temperatura absoluta y A un parámetro pre-exponencial.

Aunque la influencia de la temperatura se produce generalmente sobre el índice de consistencia, en algunos alimentos se ha encontrado que el índice de flujo puede variar linealmente con la temperatura absoluta [Vidal *et al.*, 2004]:

$$n = a + bT \quad (\text{II, 47})$$

En otros casos, se ha correlacionado la viscosidad aparente con la temperatura a una velocidad de deformación fijada [Rao *et al.*, 1984].

En líneas generales, puede decirse que la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura [Ibarz *et al.*, 1995]. La variación de la temperatura no suele afectar al índice de flujo [Sáenz y Costell, 1986], aunque algunos autores han encontrado un aumento de este parámetro con la temperatura [Vidal *et al.*, 2004].

2.3.2.1.2 Efecto de la concentración de sólidos

Debido a que productos como zumos y purés de frutas están compuestos por partículas de sólidos dispersas en una fase acuosa, su comportamiento reológico se verá influenciado por la concentración, composición química, tamaño, forma y disposición de las partículas que componen la fase dispersa (Costell *et al.*, 1982).

Se han descrito dos tipos de correlaciones para considerar el efecto de la concentración de sólidos en la viscosidad [Harper y El-Sahrigi, 1965; Saravacos, 1970; Rao *et al.*, 1984]:

$$\text{Modelo potencial} \quad \eta = k_1 C^{A_1} \quad (\text{II, 47})$$

$$\text{Modelo exponencial} \quad \eta = K_2 \exp(A_2 C) \quad (\text{II, 48})$$

En estas ecuaciones, K_1 , K_2 , A_1 y A_2 son constantes y C es el contenido en sólidos, expresado en ° Brix. Estas ecuaciones también son válidas para estudiar el efecto de la concentración en el índice de consistencia.

El modelo potencial se ha aplicado en purés de frutas y hortalizas altamente viscosos [Vitali y Rao, 1982]. Sin embargo, los mismos autores

encontraron que el modelo exponencial proporcionaba mejores ajustes para zumos de frutas. Esto último ha sido confirmado por otros autores que han estudiado la reología de zumos clarificados de diversas frutas [Ibarz *et al.*, 1989; Ibarz y Ortiz, 1993; Schwartz y Costell, 1989].

Así, por tanto, un aumento de la concentración de sólidos comporta un incremento de la viscosidad o del índice de consistencia. También puede afectar a otros parámetros como el umbral de fluencia, que si bien tiende a aumentar con la concentración a veces se ha descrito el efecto contrario [Ibarz *et al.*, 1991]. Por lo que respecta al índice de flujo, un aumento de sólidos, o bien no le afecta [Sáenz y Costell, 1986], o bien hace que disminuya [Mizrahi y Berk, 1972].

2.3.3 Reología de pulpa de frutas

El Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN,2008], define pulpa de frutas como el producto carnoso y comestible de la fruta sin fermentar pero susceptible de fermentación, obtenido por procesos tecnológicos adecuados, por ejemplo, entre otros, tamizando, triturando o desmenuzando, conforme a buenas prácticas de manufactura, a partir de la parte comestible, y sin eliminar el jugo, de frutas enteras o peladas en buen estado, debidamente maduras o, a partir de frutas conservadas por medios físicos.

Las pulpas de frutas son productos semilíquidos que están compuestos por partículas sólidas dispersas en una fase, su comportamiento reológico está influenciado por la concentración, la composición química, tamaño, y forma de las partículas que componen la fase dispersa [Costell y Durán, 1982]. Las pulpas de frutas constituyen la materia prima para productos derivados como jugos, néctares, cremas, etc. Para que los procesos industriales sean técnica y económicamente factibles es importante tener conocimiento de sus propiedades

físicoquímicas y comportamiento reológico, tanto para el control de calidad, como para la evaluación de los procesos [Ibarz, *et al.*, 1996].

La reología de las pulpas tiene una gran importancia en la industria del procesamiento de frutas, incluyendo aplicaciones tecnológicas, sensoriales y de ingeniería, como, por ejemplo, proyectos de bombas, tuberías, intercambiadores de calor y tanques de mezclado [Torrallés *et al.*, 2006].

La causa de la desviación del comportamiento newtoniano, observado en productos de frutas, como por ejemplo pulpas, se debe a su composición. Dichos alimentos pueden ser aproximados a un sistema de dos fases, donde los sólidos en suspensión están formados, principalmente, por tejido desintegrado, que contiene fibra celulósica, pectinas y partículas lipoides que contienen carotenoides y aceites esenciales. La viscosidad depende además, de la concentración y el grado de polimerización de la pectina, así como del pH y de las sales existentes.

Para las pulpas de frutas es típico el comportamiento pseudoplástico a diferentes temperaturas, observándose una disminución de la viscosidad aparente a medida que aumenta el gradiente de velocidad. Desde el punto de vista industrial, este comportamiento pseudoplástico facilita el flujo de la pulpa y el intercambio de calor durante el procesamiento, debido a que una disminución de la viscosidad aparente ocasiona una menor pérdida de carga durante el flujo, dando como resultado una menor demanda de energía para su procesamiento. Así por ejemplo, la disminución en la viscosidad de la pulpa de mora con la velocidad de cizalla facilita el flujo y el intercambio de calor durante el procesamiento [Haminiuk *et al.*, 2006], similar el observado en la pulpa de mango integral [Vidal *et al.*, 2004].

La temperatura es uno de los factores que más afectan a la viscosidad de las pulpas de frutas, pues la mayoría de estas se presentan en forma de sólidos dispersos en medios líquidos. Un aumento de la

temperatura en este caso hace que la viscosidad de la fase líquida disminuya, aumentando el movimiento de las partículas en suspensión, causando una disminución de la viscosidad de la pulpa [Pelegrine, 2002].

En general, las pulpas de frutas pueden perder sus características pseudoplásticas y ser menos consistentes a medida que se incrementa la temperatura. En la pulpa de mango, la temperatura tiene un mayor efecto sobre el índice de consistencia (k), que sobre el índice de comportamiento al flujo (n) [Vidal et al., 2006].

2.3.3.1 Caracterización reológica de pulpa de frutas tropicales

La inexistencia de datos reológicos para diversas pulpas de frutas tropicales lleva a la industria a aplicar, en el procesamiento de pulpas y jugos, condiciones semejantes a las aplicadas en la producción de productos derivados de naranja, a pesar de las características diferentes de cada fruta, acarreando errores en el diseño y control del proceso [Andrade, 2007]. Por tanto, existe una demanda creciente de datos reológicos para cada fruta en particular.

El modelo matemático más utilizado para la caracterización reológica de las pulpas de frutas es el de la ley de la potencia [Torralles et al., 2006].

Diferentes investigadores usaron este modelo para describir el comportamiento reológico de pulpas de frutas: pulpa de mango (*Mangífera indica* L-Keitt) [Vidal et al., 2004], pulpa de arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) [Nindo et al., 2007], pulpa de guayaba (*Psidium guajava*), pulpa de guanábana (*Annona muricata*), pulpa de zapote (*Calocarpum sapota* Merr) y pulpa de níspero (*Achras sapota*) [Andrade, 2007].

Los valores del índice de flujo de las pulpas de guayaba agria, roja y blanca son 0,216; 0,175 y 0,240, respectivamente, de la pulpa de

guanábana es de 0,221 y de la pulpa de níspero de 0,221, en consecuencia, son cercanos entre sí, pero difieren notablemente del índice de flujo de la pulpa de zapote que es de 0,039, la cual es la más pseudoplástica [Andrade et al., 2007]. La naturaleza altamente pseudoplástica de la pulpa de guayaba es indicativa de su estabilidad inherente para ser utilizada en productos con valor añadido, dado que los valores del índice de flujo de la pulpa, apenas muestran cambios significativos, a pesar de que se modifiquen las condiciones de procesado y conservación [Harnanan et al., 2001].

Este comportamiento es similar en otras pulpas de frutas, como mango [Pelegrine et al., 2002, Branco et al., 2003, Vidal et al., 2004, Dak et al., 2006, Dak et al., 2007], guayaba [Ferreira et al., 2002, Medina, et al., 2003, Sánchez et al., 2006] y cereza de las indias [Da Silva et al., 2005].

Se ha estudiado la viscosidad aparente de las pulpas de piña y mango [Pelegrine et al., 2002], quienes evaluaron el comportamiento reológico de las pulpas frescas y centrifugadas a 30 ° C de temperatura. Se observó un comportamiento pseudoplástico para todas las pulpas, y la mayor pseudoplasticidad para las pulpas frescas. El modelo de Casson modificado [Mizrahi y Berk, 1972], fue el que mejor se ajustó a los datos obtenidos.

No hay diferencias estadísticamente significativas entre los datos de viscosidad aparente de ascenso y descenso, para las pulpas de guanábana, zapote, níspero y guayaba tipo blanca, por lo que estas pulpas no presentan tixotropía. La pulpa de guayaba tipo agria y roja, presenta sin embargo pequeños porcentajes de tixotropía [Andrade, 2007].

Queiroz (1998) estudió el efecto de sólidos en suspensión en las pulpas de mango y de piña, concluyendo que ejercen gran influencia en el comportamiento reológico de dichas pulpas.

La pulpa de zapote pierde características pseudoplásticas y se torna menos consistente a medida que se incrementa la temperatura, el índice de consistencia se ve afectado por la temperatura, según el modelo de Arrhenius, con una energía de activación de 23952,5 J/mol [Andrade, 2010].

El comportamiento reológico de las pulpas de frutas también comprende la caracterización de sus propiedades viscoelásticas. Generalmente, las pulpas de frutas tropicales a alta concentración en sólidos solubles presentan un comportamiento viscoelástico. Esto puede ser atribuido a altos contenidos en pectinas, que implica la formación de un gel más fuerte. A medida que la concentración de pulpa disminuye, especialmente a bajas frecuencias, se observa un comportamiento semi-líquido, mientras que a frecuencias más elevadas, se observa el desarrollo de un comportamiento tipo gel. A concentraciones de sólidos solubles más bajas, predomina el carácter viscoso, así que se comportan como alimentos semi-líquidos [Mota e Ibarz, 2006].

2.3.4 Reología de productos derivados de la pulpa de frutas

Un factor de gran importancia en la elaboración de productos alimentarios derivados de frutas como mermeladas, jaleas, cremogenados, es la caracterización de su comportamiento reológico. Las propiedades reológicas de los fluidos alimentarios son parámetros claves para el control de calidad, la textura, la aceptación del consumidor y el proceso propiamente dicho [Holdsworth, 1993].

El comportamiento de flujo de diversos productos alimenticios, especialmente pulpas de frutas, mermeladas, jaleas y pastas, que contienen niveles altos o moderados de azúcares y/o la cantidad muy pequeña de agente gelificante, se ha estudiado ampliamente [Carbonell *et*

al, 1991; Gabriele *et al* 2001; Alvarez *et al* 2006]. Se ha establecido que las propiedades reológicas de estos productos están afectadas por la cantidad y el tipo de azúcar, la proporción y tipo de agente gelificante utilizado, el contenido de fruta y la temperatura [Farkas y Glicksman, 1966; Saravacos, 1970].

En general, tienen un comportamiento pseudoplástico muchos derivados de frutas y vegetales como algunos zumos y cremogenados de frutas [Saravacos, 1970; Guerrero y Alzamora, 1998; Álvarez *et al.*, 2008], derivados del tomate [Tanglertpaibul y Rao, 1987], confituras de fruta [Costell *et al.*, 1986]; el ketchup y la mostaza francesa [Higgs y Norrington, 1971; Rao, 1992]; concentrados de zumo de naranja [Vitali y Rao, 1984]; puré de batata [Kyereme *et al.*, 1999]; pastas de harina de arroz [Wang y Sun, 1999]; pasta de jengibre [Ahmed, 2004]; sirope de cacao [Sikora *et al.*, 2007], y otros más.

La mermelada se puede considerar un sistema sólido-líquido tipo gel, con una estructura que inmoviliza el líquido y le confiere propiedades viscoelásticas [Tabilo-Munizaga y Barbosa-Cánovas, 2005].

Se han publicado las propiedades reológicas, texturales y sensoriales de formulaciones de mermeladas elaboradas con frutas tropicales más populares y universalmente aceptadas que el borjón, como la piña y el mango [Pelegri *et al.*, 2002; Basu y Shivhare, 2010; Basu *et al.*, 2007, 2011].

El comportamiento de flujo de las confituras más convencionales ha sido ampliamente investigado en el pasado [Carbonell *et al.*, 1991; Alvarez, *et al.*, 2006; Basu y Shivhare, 2010].

Sin embargo, menos atención se ha prestado al comportamiento de flujo en función del tiempo [Basu *et al.*, 2007] y a las propiedades viscoelásticas lineales [Basu *et al.*, 2011]. A partir de la literatura

existente, se puede deducir que los factores más importantes que afectan a la Reología de las formulaciones de mermelada son la composición, las interacciones entre los componentes, el contenido de pectinas, azúcar y la temperatura.

En relación al comportamiento reológico de batidos de leche elaborados con pulpas de frutas, no existen tantos trabajos publicados, Jadhav *et al.*, (2003) estudiaron la determinación de la aceptabilidad de un batido de leche con pulpa de zapote (color, apariencia, sabor, textura, aceptabilidad general) con diferentes concentraciones (10, 20 y 30%) de pulpa. La leche de vaca fue filtrada, pasteurizada (63 ° C durante 30 min) y se enfrió a 5 ° C. La pulpa de zapote y el azúcar fueron añadidos a la leche. Los resultados del análisis mostraron que las puntuaciones para el color y apariencia, cayó al aumentar el contenido de pulpa. El batido con un 10% de pulpa, tuvo más aceptación para el sabor y la consistencia.

Al aumentar el nivel de pulpa de zapote también aumentó la viscosidad, que no fue del agrado de los jueces. La aceptabilidad global disminuyó cuando la concentración de pulpa fue del 30% en el batido.

Se han desarrollado trabajos en la India de batidos de banano en polvo, elaborados con leche de un contenido graso del 2% y pulpa de banano. Tras la reconstitución con agua, se obtuvo una alta aceptación de la bebida [Mann, 1995].

Martínez *et al.*, (1998) estudiaron el efecto de diferentes proporciones de 210 Hemkold (estabilizante) sobre la viscosidad de las mezclas en polvo para la preparación de la leche y batido de vainilla. Se prepararon diversas formulaciones mezclando los ingredientes. El producto seleccionado, con el 1,2% de estabilizante, mostró buena aceptabilidad sensorial, viscosidad adecuada y una vida útil de 90 días a temperatura ambiente.

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materia prima

Se escogieron al azar frutos maduros, sin daños en su superficie según apreciación visual, provenientes de fincas aledañas al cantón Mocache, Provincia de Los Ríos, (Ecuador) y se transportaron al Laboratorio de Bromatología de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo. La materia prima se pesó y se lavó para eliminar materiales extraños. Los frutos se cortaron en mitades longitudinales y se realizó el despulpado de forma manual, eliminándose la corteza y las semillas, la pulpa obtenida fue envasada en bolsas de polietileno y congelada a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta el momento de su utilización para los respectivos análisis.

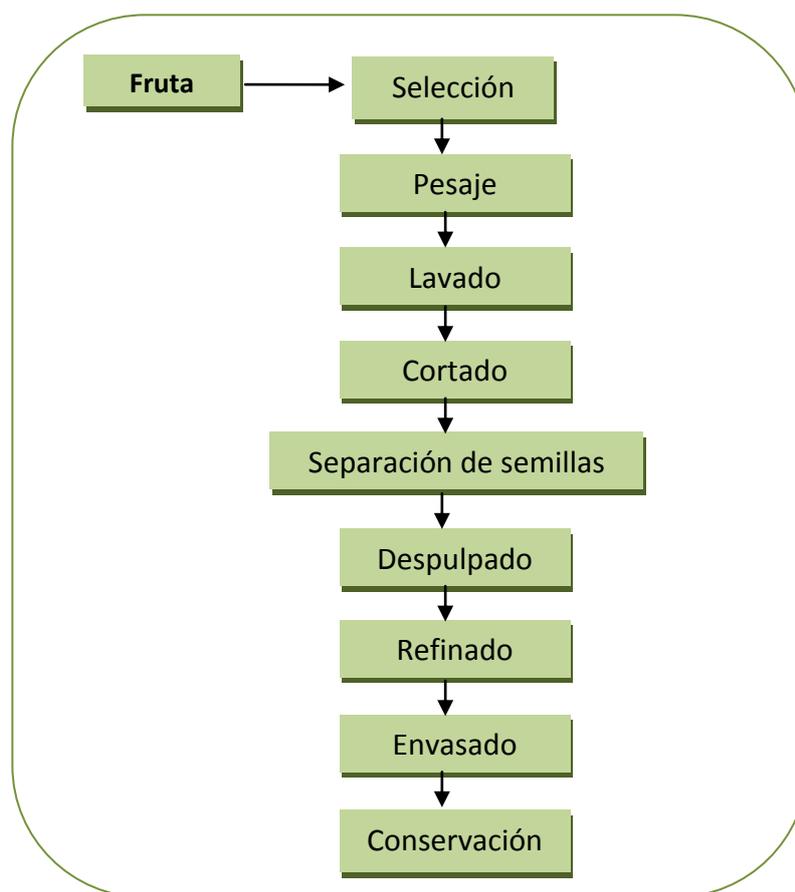


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la elaboración de pulpa de borojó (*Borojoa patinoi* Cuatrec.).

La Figura 3.1 recoge los distintos pasos en la obtención de la pulpa fresca de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.), Las muestras fueron evaluadas por duplicado. El tamaño de las muestras de pulpa fresca empleada fue de 3 kg, aproximadamente.



Figura 3.2 Fruto de borjón cortado en mitades longitudinales.

3.2 Elaboración de mermeladas de borjón, con adición de diferentes concentraciones de pectina

El aumento de la concentración de sólidos en un producto y la gelificación del mismo ejercen una acción inhibitoria sobre el desarrollo de microorganismos debido a la baja disponibilidad de agua libre. Si a esto se suma la presencia de un medio ácido, se puede limitar aún más el deterioro del alimento. Tal es el caso de las mermeladas, las cuales se obtienen mediante la cocción y la concentración de una o más frutas con la adición de sustancias edulcorantes, gelificantes y acidificantes hasta obtener un gel característico.

En el proceso de elaboración de las mermeladas el porcentaje de azúcar contribuye de forma directa para que se produzca la gelificación de la mermelada. Esta gelificación ocurre cuando se alcanza una

concentración de sólidos solubles entre los 60 y 70 °Brix. Si este nivel se sobrepasa se produce la cristalización de los azúcares y por otro lado, si el porcentaje es inferior, se dificulta lograr una adecuada gelificación.

En el caso de la mermelada de borjón, en la formulación no se hace ajuste alguno de la acidez del producto ya que el pH que tiene la pulpa de la fruta asegura la inversión de la sacarosa, que es el azúcar utilizado, como también la hidrólisis de la pectina, facilitando la formación de gel.

3.2.1 Diagrama del proceso de elaboración de mermeladas de borjón

Las formulaciones modelo de mermelada de borjón se prepararon utilizando pulpa de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.), azúcar de calidad comercial comprada en un supermercado local y como aditivo se usó pectina de alto metoxilo, de configuración rápida, 153 EE.UU. SAG, Unipectine RS 150 (Cargill Solutions Texturizing, Francia).

Las mermeladas de borjón se prepararon usando un procedimiento convencional. La pulpa de borjón fue descongelada a temperatura ambiente durante aproximadamente hora y media, luego se procedió a licuar la pulpa de borjón.

La cantidad de azúcar que se añade (45:55 relación pulpa / azúcar) y la cantidad de agua que se evapora, se calculó de acuerdo a la norma técnica ecuatoriana [INEN 419, 1988] para llegar al menos a 65 ° Brix y 50% de pulpa en el producto final, la indicada norma técnica ecuatoriana establece para las mermeladas una concentración mínima de fruta del 45 %.

La pulpa de borjón utilizada en este trabajo contiene 2,6% de pectina (base húmeda), y se añadió pectina de alto metoxilo con concentraciones de 0,25; 0,50; 0,75 y 1% en peso.

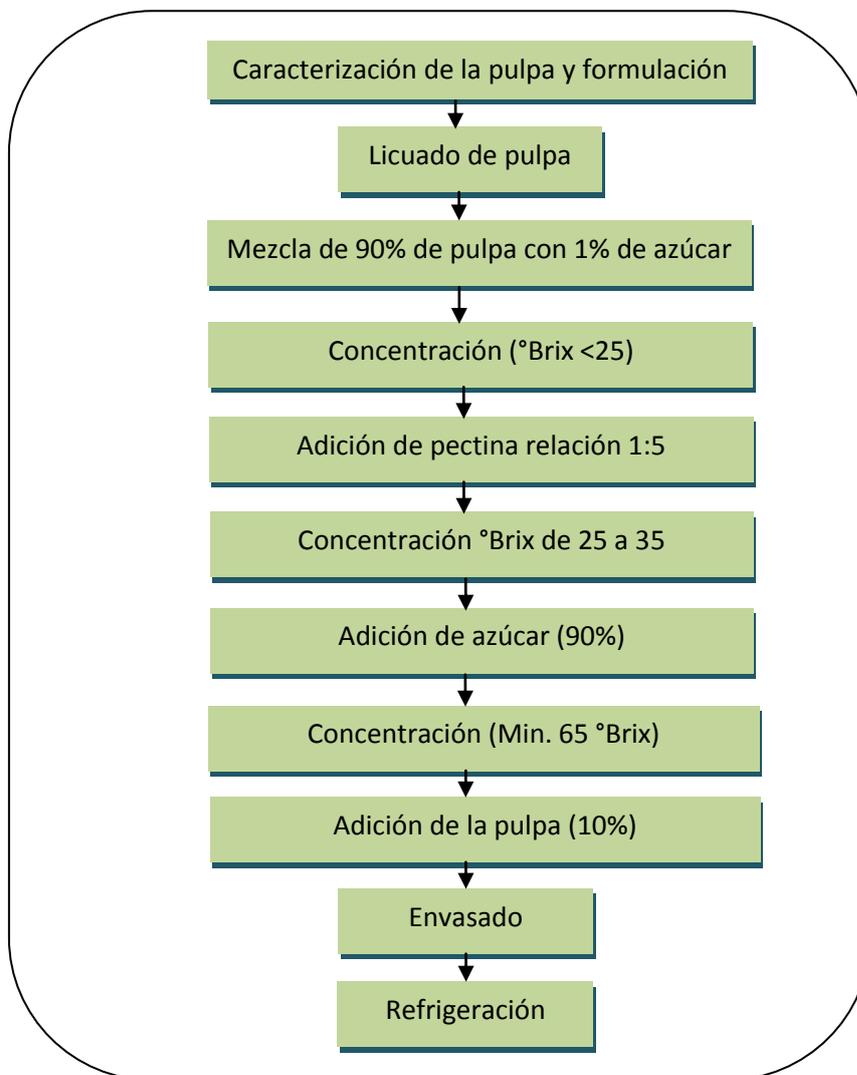


Figura 3.3 Diagrama de flujo de la elaboración de mermelada de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.).

Las formulaciones artesanales de mermeladas se prepararon sobre la base de 250 g de pulpa de borjón. Inicialmente, el 90% de la pasta se mezcló a 80 °C con sólo el 10% del azúcar total calculado para facilitar la evaporación. La pectina entonces fue añadida antes de llegar a 25 °Brix,

con el fin de favorecer la completa disolución, previamente mezclada con sacarosa en una relación en peso 1:5, mientras se agitaba vigorosamente.

La evaporación se continuó a una temperatura no superior a 90 ° C hasta 35 °Brix, durante 6-10 min a presión atmosférica. En este momento, se añadió el resto de sacarosa rápidamente hasta llegar a 65-67 °Brix y después se añadió el 10% restante de la pulpa de borjón. La Figura 3.3 muestra el diagrama de flujo del proceso de elaboración de las mermeladas estudiadas

La acidez de la pulpa de borjón asegura un valor de pH inferior a 3,3 durante la preparación de mermelada y por lo tanto, no es necesario un nuevo ajuste del pH.

3.2.2 Formulación de mermeladas artesanales a partir de la pulpa de borjón

La formulación de mermeladas debe cumplir con las exigencias de calidad propias de las mermeladas contempladas en la norma ecuatoriana INEN 419 y que contribuyen a lograr las cualidades peculiares del producto final, sólidos solubles del producto terminado (expresados como grados Brix), la acidez total y pH.

La calidad de las mermeladas depende de las características de la pulpa empleada, para su formulación es especialmente importante la caracterización de la pulpa de la fruta utilizada, determinar su contenido de sólidos solubles, el pH, la acidez y saber si contiene o no pectina.

La formulación de las mermeladas se efectuó utilizando un procedimiento convencional establecido para variedades comerciales de frutas, acorde a la norma ecuatoriana [INEN 419, 1988].

3.2.3 Envasado

Esta operación se efectuó a una temperatura superior a la de gelificación. La pectina rápida gelifica a una temperatura de 85°C, por lo que el envasado de mermelada de borjón se realizó en frascos cilíndricos de 250 ml a 88 ° C al vacío, a continuación se enfriaron a temperatura ambiente (25 ° C) y se almacenaron a 4 °C. Se cerró el envase y se lo invirtió para esterilizar la tapa y lograr un vacío total. Con este procedimiento no hay necesidad de someter el producto a posteriores tratamientos térmicos. Los frascos obtenidos se dejaron enfriar en reposo para lograr la formación del gel.

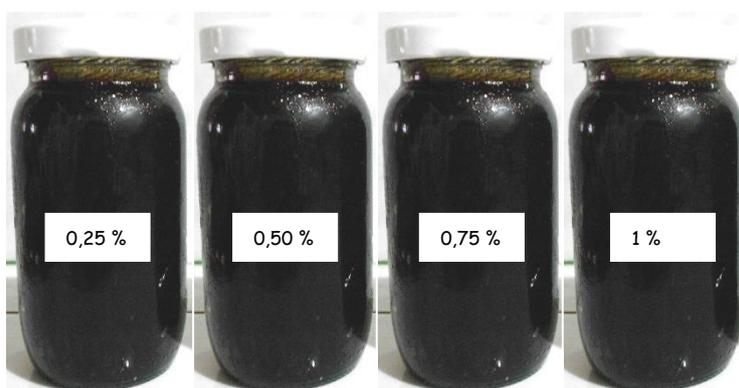


Figura 3.4 Mermeladas de borjón con diferentes concentraciones de pectina añadida

3.3 Desarrollo de batidos de leche de soya y borjón, con diferentes concentraciones de sólidos

Para la elaboración de los diferentes batidos se emplearon los siguientes ingredientes: leche de soya en polvo marca “Alimentos Manna” (Puembo -Quito, Ecuador), azúcar blanco comercial, pulpa fresca de borjón y agua desionizada.



Figura 3.5. Batidos artesanales de leche de soya con borjón con diferentes concentraciones de sólidos.

3.3.1 Preparación de las muestras

La leche de soya fue preparada a partir de agua desionizada y leche de soya en polvo. La formulación de los batidos artesanales de leche de soya con borjón, se hizo siguiendo un esquema que considera 5 niveles de azúcar, para lo cual en cada caso, se pesó 25 g de leche de soya en polvo y se disolvió en 250 ml de agua desionizada, agregando luego 15 g de pulpa de borjón y azúcar blanco, con agitación, y mezclando hasta alcanzar 8, 12, 14, 16 y 18 °Brix, se ajustó la concentración de sólidos mediante mediciones refractométricas. El azúcar actúa como edulcorante natural, provee los azúcares simples, glucosa y fructosa, que contribuyen a las propiedades palatables de los batidos elaborados

Los batidos obtenidos se homogeneizaron en un equipo Ultra-Turrax T50 Basic (Ika-Werke, Alemania).

Las muestras fueron almacenadas en frascos de vidrio esterilizados, bajo refrigeración entre 0 y 7°C, hasta realizar los ensayos fisicoquímicos y reológicos.



Figura 3.6. Homogeneizador Ultra Turrax T50 (Ika Werke, Alemania)

3.4 Muestras de productos alimentarios comerciales derivados de la pulpa de borojó

Se seleccionaron muestras de mermeladas y batidos comerciales de borojó. La mermelada comercial de borojó fue suministrada por la industria Gamboína (Francisco de Orellana, Ecuador). Como producto de referencia se usó la mermelada comercial de melocotón de la marca Helios (España), que se adquirió en un supermercado de la ciudad de Huelva.



Figura 3.7. Mermelada comercial de borojó marca Gamboína y batido comercial leche de soya con borojó marca La Oriental

El batido comercial de leche de soya con borjón fue de la marca La Oriental y fue adquirido en un supermercado de la ciudad de Quevedo (Ecuador).

El criterio de selección de las muestras comerciales estuvo determinado por la identificación de marcas principales del mercado. Todas las medidas se realizaron dentro del período de vida de anaquel declarado de cada muestra.

3.5 Caracterización bromatológica y fisicoquímica

Los análisis bromatológicos y fisicoquímicos se realizaron en base seca por duplicado, utilizando métodos normalizados [AOAC, 2000].

3.5.1 Determinación de la humedad

La humedad se determinó en una estufa de vacío Heraeus a 70° C y 100 mm Hg, según el método 920.151.



Figura 3.8 Estufa de vacío Heraeus

Este método consiste en la determinación de la pérdida de peso de la muestra mediante desecación de la misma en una estufa de vacío ($P = 10$ mm Hg), a una temperatura no superior a 70 °C, dejando secar hasta peso

constante. La variación de peso se midió en una balanza analítica Mettler AE 100.

3.5.2 Determinación de cenizas

Las cenizas se determinaron en una mufla Lindberg a 525° C, según el método 940.26. Se pesaron aproximadamente 2 g de muestra fresca en los crisoles correspondientes y se carbonizaron en placas calefactoras.



Figura 3.9 Mufla marca Lindberg

Se agregó a cada crisol 1 ml de ácido nítrico para obtener cenizas blancas. Una vez evaporado el ácido nítrico, los crisoles se llevaron a la mufla a 250 °C durante 2 horas, aumentando paulatinamente la temperatura hasta 550 °C, manteniéndose durante 6 horas.

3.5.3 Determinación de extracto etéreo

Se determinó el contenido de extracto etéreo por el método Goldfish 920.85, que consiste en una extracción continua con un disolvente orgánico a partir de las muestras previamente secadas en estufa de vacío. Éste se calienta, volatiliza para posteriormente condensarse sobre la muestra.

El disolvente gotea continuamente a través de la muestra para extraer la grasa. El contenido de grasa se cuantifica por pérdida de peso en la muestra o por grasa extraída [Nielsen, 2003].

Se empleó un extractor de grasas tipo Goldfish, marca Labconco y éter de petróleo para extraer las grasas.



Figura 3.10. Extractor de grasas Goldfish, marca Labconco

3.5.4 Determinación del contenido en proteínas

La cuantificación de proteínas se llevó a cabo con un equipo Kjeltec 1002, marca Tecator, de acuerdo al método de Kjeldahl 2001.11, que consiste en el análisis del contenido en nitrógeno total y la aproximación al porcentaje de proteínas multiplicando por un factor de conversión. A partir de la muestra seca, se tomó una cantidad conocida de ésta para ser depositada en tubos de digestión. Posteriormente se adicionó, en su orden, una pastilla catalizadora ($K_2SO_4+CuSO_4+Se$, en proporción 10:10:1), 10 ml de ácido sulfúrico concentrado y 5 ml de agua destilada. Posteriormente se llevó a la unidad de digestión Kjeltec durante aproximadamente 45 min.

Después de enfriar se adicionaron al tubo de digestión 50 ml de agua destilada, para ser llevadas a la unidad de destilación, se utilizó una cantidad suficiente de hidróxido sódico 1 N, para alcalinizar fuertemente el medio y así desplazar el amoniaco de las sales amónicas.

La muestra destilada fue recogida en un matraz erlenmeyer que contenía una disolución de ácido bórico al 4%. El contenido de nitrógeno fue valorado con ácido sulfúrico 0.3N y fenolftaleína como indicador. El blanco se preparó siguiendo el mismo procedimiento en un tubo de digestión sin adición de la muestra. El análisis se realizó por triplicado. El contenido en nitrógeno se calculó empleando la ecuación III,1 y a partir de este valor se calculó el porcentaje de proteína utilizando 6.25 como factor de conversión [AOAC No. 955.04C], según la ecuación III, 2:



Figura 3.11. Unidad de destilación de proteínas Kjeltec 1002, marca Tecator

(III, 1)

$$N = 0,14 \times \frac{V_1 - V_2}{m} \times 100$$

donde:

N: porcentaje de nitrógeno (g nitrógeno/ 100 g muestra)

V₁: volumen (ml) de ácido sulfúrico valorados en la muestra

V₂: volumen (ml) de ácido sulfúrico valorados en el blanco

m: peso de la muestra

$$P = N \times 6.25 \quad (\text{III, 2})$$

donde P: porcentaje de proteínas (g proteínas/100 g muestra)

3.5.5 Determinación de sólidos solubles

Se determinó el contenido de sólidos solubles según el método 932.12. Las muestras fueron homogenizadas previamente en el equipo Ultra-Turrax modelo T50 (Ika-Werke, Germany). En el caso de la pulpa de borjón, para obtener una disolución traslúcida, se mezclaron aproximadamente 5 g de pulpa con agua destilada en proporción 1:1. Esta mezcla se centrifugó a 10000 rpm a 4 °C durante 10 min. y se midieron los grados Brix al sobrenadante empleando un refractómetro Abbe Atago, con sensibilidad de 0.01 °Brix, acoplado a un sistema de circulación de agua a 20 °C.



Figura 3.12. Refractómetro Abbe Atago

3.5.6 Determinación de acidez total titulable

Se determinó la acidez titulable expresada como ácido málico, según el método 942.15, que consiste en determinar la acidez por medio de una

titulación ácido-base con una solución de álcali estandarizado, expresando los resultados de la acidez titulable como el equivalente en masa de ácido.

Se valoran 20 ml de muestra con NaOH 1M hasta llegar a un pH cercano a 6 y se continúa la valoración hasta un pH 8,1, anotando el gasto total de la titulación. El cálculo se realiza según la ecuación (III,3).

$$\% \text{ acidez (g ácido málico/100ml)} = \frac{V_1 * C * f (\text{ácido málico}) * 1000}{\text{masa de muestra (g)}} \quad (\text{III, 3})$$

Donde:

V_1 = Volumen consumido de la disolución de NaOH estandarizada.

C = Concentración de la solución de NaOH estandarizada.

$C_{[\text{NaOH } 0.1\text{M}]}$ = Concentración ideal de la disolución de NaOH (0,1M).

$f_{[\text{ácido málico}]}$ = factor de conversión de equivalencia de 1 mL de NaOH 0,1M, a ácido málico anhidro (0,006704).

3.5.7 Determinación de pH

Se determinó el pH por lectura directa en un pH-metro Orión, según el método 981.12, basado en la medición electrométrica de la actividad de los iones hidrógeno presentes en una muestra del producto mediante un medidor de pH (potenciómetro).



Figura 3.13 pH metro Orión

Para determinar el pH de la pulpa de borjón se homogeneizó un peso aproximado de 100g de pulpa con 100 ml de agua destilada y se procedió a la medición.

3.5.8 Determinación de fibra cruda

La fibra cruda fue determinada por hidrólisis y filtración en crisoles Gooch, según el método 113 [ICC, 2001].

La fibra cruda es la pérdida de masa que corresponde a la incineración del residuo orgánico que queda después de ser digerida con disoluciones de ácido sulfúrico e hidróxido de sodio en condiciones específicas. La diferencia de pesos después de la calcinación nos indica la cantidad de fibra presente.

Se pesaron 2 gramos de muestra desengrasada y seca, se colocó en un matraz y se adicionó 200 ml de disolución de ácido sulfúrico 0,255 N en ebullición, se dejó hervir en el condensador por 30 minutos, se dejó reposar y se filtró usando succión en un embudo Buchner. Se transfirió el residuo a un matraz conteniendo NaOH 0,31 N en ebullición, se dejó hervir por 30 minutos como en el paso inicial, se lavó el residuo con HCl y éter de petróleo, se colocó en crisol en la estufa a 105°C por 12 horas. Se enfrió en desecador, se pesaron los residuos y se incineraron en la mufla a 550 °C por 3 horas. El contenido de fibra cruda se calcula según la ecuación (III,4).

$$\text{Fibra cruda (\%)} = \frac{100 \times ((\text{Crisol} + \text{Residuo}) - (\text{Crisol} + \text{Cenizas}))}{\text{muestra (g)}} \quad (\text{III, 4})$$

3.5.9 Determinación de carbohidratos totales

Se calculó teóricamente su valor de acuerdo al método descrito por Hart y Fisher (1991).

3.5.10 Cálculo del valor energético

Se realizó el cálculo teórico según la Tabla de Composición de Alimentos de Centro América [INCAP, 2007].

3.5.11 Determinación del contenido de fósforo

Se determinó el contenido en fósforo mediante espectrofotometría [Ranganna, 1977]. El método se basa en la reacción del ión fosfato con molibdato (MoO_4^{2-}) que da lugar a fosfomolibdato ($[\text{PO}_4\text{12MoO}_3]^{3-}$). Este último origina un compuesto denominado “azul de molibdeno”. Como reductor se utilizó el ácido ascórbico.

Se pesó 1 g de muestra seca en un crisol de porcelana, se la calcinó a 500 °C por 8 horas hasta cenizas blancas, se trataron las cenizas en el crisol a temperatura ambiente con 5 ml de agua y 5 ml de ácido clorhídrico, y se calentó en estufa eléctrica hasta ebullición, se filtró el contenido del crisol y se recogió el filtrado en un balón aforado de 50 ml, enrasando con agua destilada.

En matraces de 50 ml se pipeteó la cantidad adecuada de disolución patrón de fosfato. A continuación, con cuidado y sin dejar de agitar se añaden 5 ml de disolución de molibdato y 3 ml de disolución reductora. Se enrasa con agua y se agita la mezcla para homogeneizarla, dejándola reposar a continuación unos 6 min.

Se midió la absorbancia a 660 nm en un espectrofotómetro Spectronic empleando como blanco una disolución preparada de igual manera pero sin analito y se elaboró la recta de calibrado.

Finalmente, se pipeteó 5 ml de la disolución de la muestra y se la sometió al procedimiento anterior, calculando el contenido en fósforo en la pulpa de borjón a partir de la recta de calibrado.



Figura 3.14 Espectrofotómetro Spectronic 20

3.5.12 Determinación de hierro y calcio

La concentración de hierro y calcio se determinó por absorción atómica utilizando un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin Elmer, Analyst 300 (EE.UU), según el método [DECAB-EPN, 2007].

3.6 Evaluación microbiológica de la pulpa de borojón

Las normas de pulpas de frutas recomiendan la determinación del recuento de aerobios mesófilos, coliformes totales, hongos y levaduras. Los análisis microbiológicos se realizaron por duplicado, utilizando métodos normalizados [FDA-CFSAN-BAM].

3.6.1 Recuento total de aerobios

Se utilizó un medio de cultivo de Plate Count Agar, con incubación a 35° C durante 48 horas [FDA-CFSAN-BAM, 2001].

3.6.2 Recuento de coliformes fecales

Se utilizó un medio de cultivo de Agar Rojo Bilis Violeta, con incubación a 35° C durante 24 horas [FDA-CFSAN-BAM, 2002].

3.6.3 Recuento de hongos y levaduras

Se utilizó un medio de cultivo de Diclorán D G18, con incubación a 25° C, durante 7 días [FDA-CFSAN-BAM, 2001].

3.7 Caracterización reológica

En el presente trabajo se han realizado ensayos de flujo viscoso y de cizalla oscilatoria a los dos días de haber completado el proceso de elaboración de la pulpa de borjón y los productos alimentarios derivados.

La caracterización reológica se llevó a cabo sobre muestras sin historia previa de cizalla y a temperaturas comprendidas entre 5 °C y 60°C, realizándose al menos dos replicados por cada ensayo. Después de colocar la muestra en el sistema sensor, en todos los casos, se esperó un tiempo de 30 minutos, asegurándose con ello una termostatación adecuada de toda la muestra y que todas presentaran un proceso de relajación estructural similar. Transcurrido ese tiempo, se procedió a realizar la medida correspondiente.

Se efectuaron barridos de esfuerzo o deformación en cizalla oscilatoria, a una frecuencia de 1 rad s⁻¹, para la determinación del intervalo de viscoelasticidad lineal.

Posteriormente, se realizaron barridos de frecuencia, para obtener el espectro mecánico, aplicando un valor del esfuerzo o de deformación dentro del intervalo viscoelástico lineal, en un intervalo de frecuencias comprendido entre 0,03 y 75,36 rad s⁻¹.

Los ensayos dinámicos para el estudio de las propiedades viscoelásticas en el rango lineal, se realizaron en un reómetro de deformación controlada ARES de la firma TA Instruments (New Jersey – EEUU), utilizando una geometría de medida placa-placa de superficie

rugosa (35 mm de diámetro, 1 mm de separación) en un reómetro de esfuerzo controlado Rheoscope (ThermoHaake, Alemania), dentro de la región lineal, usando una geometría placa-placa (diámetro de 35 mm, 1 mm de separación entre placas).

Las mediciones de flujo se realizaron en un reómetro de esfuerzo controlado MARS (Modulate Advanced Rheometer System) de ThermoHaake (Karlshure- Alemania), en un rango de esfuerzos aplicados de 10-3.500 Pa, usando una geometría placa-placa de superficie rugosa de 35 mm y separación entre placas de 1 mm.



Figura 3.15 Reómetro de deformación controlada ARES (Reometric Scientific, EE.UU).



Figura 3.16 MARS (Modulate Advanced Rheometer System) de ThermoHaake (Karlshure- Alemania)

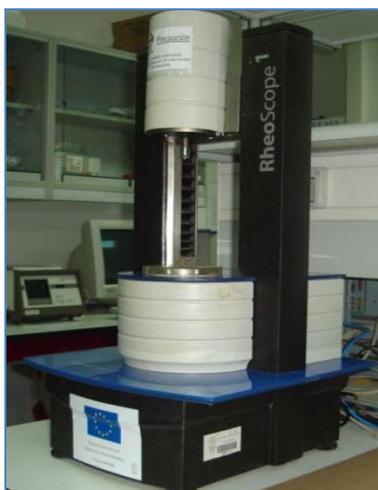


Figura 3.17 Reómetro de esfuerzo controlado RheoScope (Thermohaake, Alemania)

Algunos ensayos de flujo viscoso se realizaron en un reómetro Physica MCR-501 (Anton Paar, Austria), que permite el funcionamiento en modo de deformación controlada (mínimo del torque $0,01 \mu\text{N}$, en un rango de velocidades de deformación de 10^{-2} a 10^2 s^{-1} , usando una geometría placa-placa (25 mm de diámetro, 1 y 2 mm de separación entre placas, dependiendo de la consistencia de la muestra) con superficies rugosas.



Figura 3.18 Reómetro de esfuerzo controlado Physica MCR-501 (Anton Paar, Austria)

Para la termostatización de las muestras, cada reómetro incorpora un equipo distinto: baños termostáticos Phoenix, (Thermohaake, Alemania)

y criotermostato de circulación, modelo F25-ME, (Julabo, Alemania), respectivamente. El reómetro de velocidad de deformación controlada ARES, en cambio tiene un horno de inyección de aire en la cámara de medida.

Cada equipo está gobernado por un programa informático de adquisición de datos, Rheowin v. 2.97 (ThermoHaake, Alemania), RheoWin Job Manager y RheoWin Data Manager (Thermo Scientific), RSI Orchestrator v. 6.5.7 (Rheometric Scientific, USA) y Star Rheoplus v.3x (Austria), respectivamente.

3.8 Evaluación sensorial

La evaluación sensorial es un instrumento fiable que permite medir la calidad de los alimentos a través de los atributos que definen el producto y su validez no depende sólo del método aplicado sino de quién lo aplica y cómo lo aplica.

En los últimos años, el análisis sensorial de los alimentos ya no es una actividad secundaria y empírica, convirtiéndose en una ciencia capaz de generar resultados exactos y reproducibles [Mehinagic *et al.*, 2003].

El análisis sensorial es una ciencia multidisciplinaria que emplean los jueces humanos utilizando los sentidos de la vista, el olfato, el gusto, el tacto y el oído para medir las características sensoriales y la aceptabilidad de los productos alimenticios [Watts *et al.*, 1992]. A través de él se detectan propiedades de los alimentos tales como el color, olor, aroma, sabor y textura [Anzaldúa-Morales, 1994].

Por lo tanto, la evaluación sensorial es un factor esencial en cualquier estudio de los alimentos y se puede aplicar en muchos sectores como desarrollo y mejora de productos, control de calidad,

almacenamiento y estudios sobre los procesos de desarrollo y evaluación del potencial de mercado [Watts et al., 1992; Meilgaard *et al.*, 1999].

Los métodos de análisis sensorial se dividen en afectivos, discriminativos y descriptivos. Las pruebas afectivas son aquellas en las que el juez expresa su reacción subjetiva respecto al producto, lo que indica su aceptación o preferencia [Anzaldúa-Morales, 1994; Meilgaard *et al.*, 1999]. Las pruebas discriminativas tienen como objetivo establecer si existe o no una diferencia entre dos o más muestras y, en algunos casos, la magnitud o importancia de esta diferencia, con el fin de determinar la intensidad de los atributos del producto [Anzaldúa-Morales, 1994].

3.8.1 Selección del panel de catadores

El primer aspecto metodológico es la formación de un jurado de catadores y la organización de las catas para el estudio de las características sensoriales que describen el producto (Figura 3.19). En la primera etapa se llevó a cabo un reclutamiento interno entre estudiantes de la carrera de Ingeniería en Alimentos de la UTEQ, según la norma UNE 87024-1-95. En esta etapa fueron seleccionadas 32 personas.

Durante el entrenamiento, fue muy importante familiarizar a los individuos en el procedimiento de evaluación sensorial y mejorar la habilidad para reconocer, identificar y cuantificar los atributos sensoriales.

Se realizaron pruebas de ordenación, de preferencia y triangulares que son utilizadas habitualmente para la formación de catadores [Anzaldúa-Morales, 1994]. Se aplicó la norma UNE 87-003-95 para evaluar la detección de los cuatro sabores básicos y también para discriminar e identificar con escalas los diferentes parámetros de textura, evaluando alimentos de uso cotidiano como galletas, queso y caramelos.

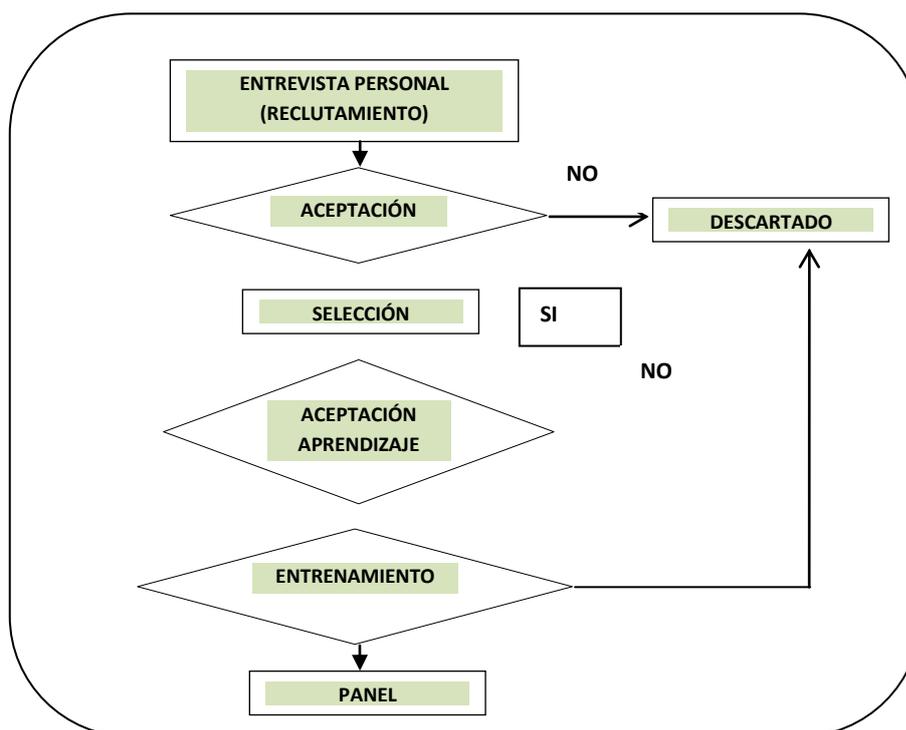


Figura 3.19 Etapas para la formación de un panel de catadores

La codificación de las muestras se llevó a cabo mediante un programa de generación de códigos aleatorios de números con un máximo de 3 cifras [Stone y Sidel, 1995].

3.8.2 Detección de gustos básicos

Las pruebas de identificación de sabores se llevaron a cabo durante 6 semanas en las cuales se suministró a los jueces en diferentes sesiones, una serie de disoluciones para identificar los sabores fundamentales dulce, ácido, salado y amargo (Tabla 3.1).

Para ello se preparó una serie de disoluciones disolviendo sacarosa, cloruro sódico, ácido cítrico y cafeína en agua mineral natural, que se presentaron en unos vasos de plástico blanco de 50 ml de capacidad debidamente codificados con números de tres dígitos.

Tabla 3.1 Cuestionario utilizado para la identificación de sabores fundamentales [Anzaldúa, 1994].

Nombres y Apellidos:						
Fecha:						
Ud. Ha recibido 7 muestras, pruébelas cuidadosamente de izquierda a derecha, comenzando por la primera de la izquierda y continúe en orden sucesivo. Marque con una "X" las disoluciones en las cuales detecta un sabor diferente del agua, continúe probando el resto de disoluciones hasta que confirme el sabor y anote el sabor identificado.						
Código Muestra	No. Identificado	Agua	Acido	Amargo	Dulce	Salado

Las concentraciones utilizadas fueron lo suficientemente elevadas como para poder ser evaluadas fácilmente: sacarosa (8 g/l) para el dulce, cloruro sódico (1,5 g/l) para el salado, ácido tartárico (0,5 g/l) para el ácido y cafeína (0,05 g/l) para el amargo [González et al., 2007].

3.8.3 Selección de atributos sensoriales

No hay un criterio uniforme en la selección del número de variables utilizadas para definir las características sensoriales de los alimentos.

Algunos autores [Sahmer y Qannari, 2008] afirman que un elevado número de descriptores causa fatiga sensorial a los catadores por lo que hay que reducir al máximo el número de variables a utilizar.

Otros autores [Varela *et al.*, 2005] utilizaron 9 atributos sensoriales para definir las características de frutas como la manzana, la mayoría de ellos relacionados con las propiedades olor, textura y aroma.

Del total de los 26 atributos recopilados de la bibliografía consultada de análisis sensorial [Elgar, 1997; Fillion, 2002; Giboreau, 2007], sólo se utilizaron aquellos considerados más interesantes a la hora de definir la calidad sensorial de las mermeladas de borjón por el 60 % de los jueces entrevistados, estos son: olor, sabor, consistencia, adhesividad y aspecto general. Para los batidos de borjón se seleccionaron los atributos: olor, sabor, consistencia y dulzor.

Con estos atributos pre-seleccionados, se elaboró una ficha de cata previa, estructurando cada variable en una escala de 7 puntos de intensidad (1-7), que se utilizó para analizar 4 muestras de mermeladas artesanales con diferente concentración de pectina añadida y la muestra comercial, así como 5 muestras de batidos artesanales con diferentes concentraciones de sólidos, permitiendo confirmar no sólo la idoneidad en la selección del panel de cata (20 catadores) sino también la de los descriptores sensoriales elegidos.

3.8.4 Pruebas descriptivas

Se llevaron a cabo las pruebas descriptivas cuantitativas, utilizando una escala para describir la intensidad de los mismos.

A cada muestra se le asignó un código para identificar los tratamientos, las muestras seleccionadas fueron presentadas a los consumidores en vasos desechables codificados con números aleatorios, para disminuir el error sistemático y otros tipos de errores que pueden influir en la respuesta del consumidor.

Entre las muestras, cada consumidor debía comer galletas de marca comercial para limpiar su paladar. Se utilizó como parámetro de respuesta el agrado general de las muestras de los productos (mermeladas y batidos) usando una escala de 1 al 7, la escala definida para los atributos sensoriales es la siguiente:

0= nada

1= algo

2= ligeramente

3= normal

4= bastante

5= demasiado

7= extremadamente

Los resultados obtenidos en el análisis sensorial se tabularon y expresaron como valores medios de cada uno de los parámetros analizados. El modelo utilizado para el análisis estadístico fue el análisis de varianza (prueba de comparaciones de Tukey) con un nivel de confianza del 95%. Los resultados se representaron mediante gráficos en tela de araña, en donde cada punto representa el valor medio de las respuestas dadas por los veinte catadores.

3.8.5 Prueba triangular

Se realizaron pruebas de diferenciación de tipo triangular para comparar entre dos muestras a la vez. Esta prueba discriminativa es muy empleada en el análisis sensorial de alimentos [UNE-EN ISO 4120-2008], la cual indica si existe o no una diferencia detectable entre dos muestras.

Los asesores recibieron tres muestras codificadas, se les indicó que dos de las muestras son idénticas y una es diferente, y se les solicitó identificar la muestra diferente. La prueba triangular es de utilidad para

determinar, por ejemplo, si la sustitución de ingredientes produce una diferencia detectable en el producto.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de la pulpa de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.)

El balance de masa realizado sobre el proceso de obtención de la pulpa de borjón, permitió establecer que se obtuvo un rendimiento promedio del 82,3% de pulpa, siendo el resto la parte no comestible del fruto (cáscara y semillas).

4.1.1 Composición bromatológica y fisicoquímica

La composición bromatológica y fisicoquímica de la pulpa fresca de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec) analizada se presenta en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Componentes bromatológicos y fisicoquímicos de la pulpa fresca de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.).

Componentes / Unidades	Resultados ²
Humedad (%)	69,41±0,26
Sólidos solubles (°Brix, a 20°C)	32,00± 0,96
Cenizas (%) ¹	0,73± 0,01
pH	2,93± 0,09
Acidez titulable (% como ácido málico)	2,60± 0,05
Carbohidratos totales (%) ¹	29,03± 3,40
Extracto etéreo (%) ¹	0,06± 0,01
Proteína (%) ¹	0,78± 0,02
Fibra cruda (%) ¹	3,50± 0,14
Fósforo (mg 100g ⁻¹) ¹	1,82± 0,07
Hierro (mg 100g ⁻¹) ¹	0,69± 0,09
Calcio (mg 100g ⁻¹) ¹	17,70± 2,60
Valor energético (Calorías)	108,00

¹ Base seca

² Valor medio y Desviación estándar

De la caracterización bromatológica y fisicoquímica de la pulpa de borjón se puede concluir, en primer lugar, que el contenido de humedad obtenido en la pulpa fresca de borjón coincide con los valores reportados en la literatura: de 69% [Mejía, 1984] y de 64,83% [Mosquera, 2005]. Este contenido en humedad favorece el procesamiento de néctar, vino y otros productos derivados.

El porcentaje de sólidos solubles fue de 32° Brix, igualmente, similar al publicado por Mejía [1984] para el mismo material (29 a 41° Brix).

El contenido de cenizas de la muestra de pulpa de borjón analizada, también concuerda aproximadamente con valores publicados previamente, de 0,8 a 1,2% [Mejía, 1984] y de 0,801% [Sotelo *et al.*, 2010]. El porcentaje de cenizas está asociado al contenido mineral y en general depende del manejo agronómico del cultivo.

El pH obtenido es similar a los reportados por otros autores para la pulpa de esta fruta, de 3,08 [Jaramillo *et al.*, 2005] y de 3,12 [Sotelo *et al.*, 2010]. La pulpa de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) presenta valores inferiores a los hallados en frutos como el noni [Chan-Blanco, 2006], perteneciente también a la familia de las Rubiáceas. El pH es importante en el control del desarrollo de poblaciones de microorganismos, de la actividad de sistemas enzimáticos, en el proceso de clarificación de jugos y bebidas, en la estabilidad de los mismos y de otros productos elaborados a partir de pulpa de frutas como jaleas y mermeladas, cuya firmeza, color y sabor están determinados por la concentración de iones hidrógeno.

La acidez titulable de la pulpa de borjón fue de 2,6, mayor a los valores reportados por otros autores, 1,78 [CORPEI, 2005] y 1,06 [Jaramillo *et al.*, 2005], respectivamente.

El cálculo de carbohidratos totales en la pulpa de borjón refleja un alto contenido de carbohidratos, superior al valor de 13,86%, reportado

por Jaramillo *et al.*, [2005]. El contenido de carbohidratos totales influye notablemente en el sabor de las frutas y es uno de los factores intrínsecos que favorece el crecimiento de las poblaciones de bacterias y mohos propios de la microflora [Jay, 1992].

Por otra parte, se encontró en la pulpa de borjón un contenido de extracto etéreo de 0,06%, valor similar al reportado de 0,04% por Arango *et al.*, [1986] e inferior al encontrado por Salamanca *et al.* [2010] de 0,83%. Generalmente, las frutas y los vegetales contienen muy bajas concentraciones de contenido graso, aunque existen algunas excepciones, tales como el aguacate, aceitunas, y algunas nueces, que en promedio tienen un 20% de lípidos [Badui, 1996].

El bajo contenido proteico de la pulpa de borjón indica ser inapropiada como fuente de proteínas, siendo incluso inferior a los valores reportados por Mejía [1984] en un rango de 0,8% a 1,3%, y Mosquera [2005] de 1,75%. La pulpa de borjón estudiada presentó un valor de fibra cruda, inferior al valor de 10% encontrado por Mejía [1984] y de 9,8% por Mosquera [2005].

Los resultados de calcio y hierro de la pulpa analizada se asemejan a los valores reportados por Mejía [1984] y Jaramillo *et al.* [2005]. En cambio, la cantidad de fósforo es inferior a los valores publicados de 160 mg 100g⁻¹ por Mejía [1984] y de 130 mg 100g⁻¹ por Mosquera [2010].

El valor energético de la pulpa de borjón concuerda con el valor reportado por Mejía [1984]. Aunque el valor energético total de las frutas es menos importante que en otros alimentos, es destacable que el valor energético de la pulpa de borjón analizada de 108 cal, es más alto que en pulpas de otras frutas amazónicas, como mamey, marañón y anona [Cavalcante, 1991].

En general, se concluye que la pulpa fresca de borjón presenta condiciones favorables para la industria alimentaria debido a su bajo pH, nivel importante de carbohidratos y de minerales como hierro y calcio.

4.1.2 Características microbiológicas

Las características microbiológicas de la pulpa fresca de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Características microbiológicas (Unidades Formadoras de Colonias por gramo de muestra) de la pulpa fresca de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.).

Microorganismo	Resultados
Aerobios mesófilos	<1x10 ¹
Coliformes totales	<1x10 ¹
Hongos	410,0
Levaduras	30,0

<1x10¹= indica no desarrollo de colonias. Dilución 1:10

El recuento de aerobios mesófilos a partir del cual se perciben modificaciones en los atributos organolépticos del producto es de 10⁶ UFC g⁻¹. En la pulpa evaluada el recuento es muy inferior y, en cualquier caso, no se detectaron alteraciones organolépticas.

Por otra parte, los recuentos de hongos y levaduras que son indicadores del deterioro de frutas y vegetales están dentro de los rangos permitidos en la normativa ecuatoriana [INEN 2 337, 2008]. Por los resultados microbiológicos obtenidos se puede afirmar que la pulpa fresca de borjón estudiada fue de óptima calidad microbiológica.

4.1.3 Caracterización reológica

4.1.3.1 Ensayos en flujo estacionario

Se llevaron a cabo ensayos en flujo estacionario, a diferentes temperaturas, observando la variación de la viscosidad con la velocidad de cizalla. La Figura 4.1 muestra las curvas de flujo viscoso de la pulpa de borrojó (*Borojoa patinoi* Cuatrec.), en función de la velocidad de cizalla, a temperaturas comprendidas entre 0 y 60°C, por encima de 60°C la muestra se seca significativamente.

Los resultados obtenidos a diferentes temperaturas (0, 10, 25, 40 y 60°C), demuestran, en todos los casos, un comportamiento pseudoplástico, caracterizado por un descenso potencial de la viscosidad con la velocidad de cizalla [Muller, 1973], con una tendencia a alcanzar un valor constante de viscosidad a bajas velocidades de cizalla, η_0 .

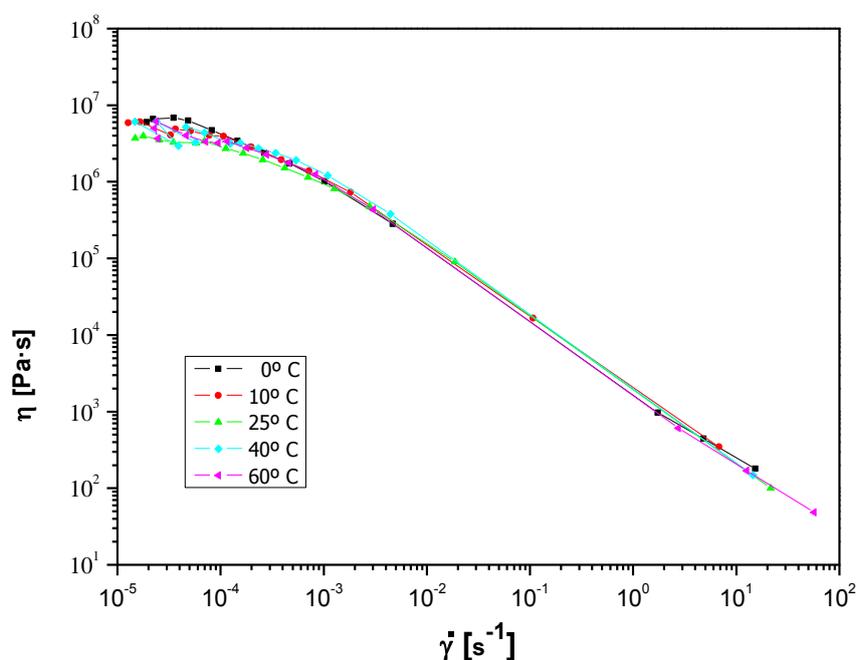


Figura 4.1 Curvas de flujo viscoso de la pulpa de borrojó (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) a diferentes temperaturas.

Por otra parte, no se observan diferencias significativas de la viscosidad aparente con la temperatura, con valores de η_0 muy similares, en un rango de 6×10^6 a 7×10^6 Pa.s. Este valor es indicativo de la viscosidad del material en situaciones de reposo o movimientos sumamente lentos.

La pectina y la cantidad de partículas dispersas son determinantes principales en las propiedades de flujo de las pulpas. Este comportamiento pseudoplástico puede ser explicado por la ruptura de una estructura reticular de moléculas de polisacáridos durante el cizallamiento, tal y como describen Morris *et al.* [1981] y Bhandari *et al.* [2002]. En un sistema reticular, la velocidad de ruptura de las interacciones moleculares existentes es superior a la velocidad de reestructuración de las mismas con el aumento de la velocidad de deformación. El resultado es una menor resistencia intermolecular al flujo y, por tanto, un descenso en la viscosidad.

Este mismo comportamiento se ha observado en diferentes alimentos derivados de la pulpa de otros frutos, tales como la pulpa de guayaba [Harnanan, 2001], puré de guayaba [Vitali y Rao, 1982], o purés de mango, papaya y melocotón [Guerrero y Alzamora, 1998].

Se realizó un ajuste de los datos experimentales obtenidos al modelo de Williamson (Ec. IV.1), que consta de tres parámetros η_0 , k y n , y describe la transición desde el comportamiento a velocidad de cizalla cero al comportamiento potencial.

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\dot{\gamma}}{k}\right)^n} \quad (\text{IV, 1})$$

donde η es la viscosidad no-newtoniana; η_0 es la viscosidad límite a bajas velocidades de cizalla (Pa.s); $\dot{\gamma}$ es la velocidad de cizalla; k una constante

relacionada con la velocidad de cizalla crítica a partir de la cual comienza el descenso potencial de viscosidad, y n el índice de flujo.

Los parámetros obtenidos por medio del ajuste al modelo de Williamson se presentan en la Tabla 4.3. El ajuste reproduce adecuadamente el comportamiento de flujo estacionario de la pulpa de borjón, con altos coeficientes de correlación, ($R^2 > 0,98$).

Por otra parte, la temperatura no afecta los parámetros del modelo en el rango estudiado de 0 a 60 °C, siendo los valores obtenidos prácticamente idénticos.

Tabla 4.3 Parámetros del modelo de Williamson para la viscosidad de la pulpa de borjón a diferentes velocidades de cizalla, a temperaturas de 0-60 °C.

T (°C)	η^0 (Pa s)	k (Pa s ⁿ)	n	R ²
0	$6,81 \cdot 10^6$	$1,62 \cdot 10^{-4}$	0,92	0,9953
10	$6,20 \cdot 10^6$	$1,83 \cdot 10^{-4}$	0,93	0,9977
25	$5,92 \cdot 10^6$	$1,47 \cdot 10^{-4}$	0,90	0,9991
40	$6,82 \cdot 10^6$	$1,80 \cdot 10^{-4}$	0,95	0,9919
60	$6,61 \cdot 10^6$	$1,48 \cdot 10^{-4}$	0,93	0,9888

4.1.3.2 Ensayos oscilatorios

Se efectuaron ensayos de barrido de deformación para determinar la región viscoelástica lineal de la pulpa de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.), como se muestra en la Figura 4.2.

Atendiendo a estos ensayos, los barridos de frecuencia se realizaron a 0,1% de deformación relativa. La evolución de los módulos de almacenamiento, G' (componente elástico), y pérdidas, G'' (componente viscoso) y de la tangente del ángulo de pérdidas, $\tan \delta$, con la frecuencia, a

diferentes temperaturas, se muestra en la Figura 4.3, para la pulpa de borojé estudiada

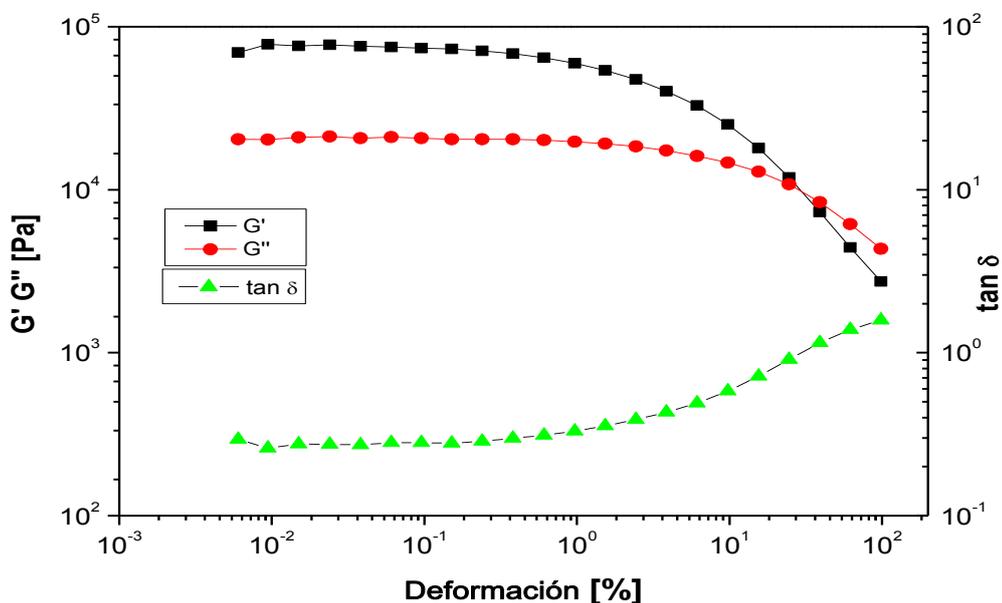


Figura 4.2 Evolución de los módulos de almacenamiento (G'), pérdidas (G'') y de la $\tan \delta$, con la deformación, para la pulpa de borojé (*Borojoa patinoi* Cuatrec.), (1Hz y 25 °C).

Como puede observarse en la Figura 4.3 los valores de G' son mayores que los de G'' , en todo el rango de frecuencias, presentando un comportamiento predominantemente elástico, donde ambas funciones aumentan ligeramente con la frecuencia de forma casi paralela, similar al encontrado en diversos alimentos tales como derivados del tomate [Tanglerpaibul y Rao, 1987], miel [Gómez-Díaz *et al*, 2004], pulpa de níspero [Andrade *et al*, 2009], pulpa de membrillo [Mota e Ibarz, 2006], y en las masas elaboradas con harinas de distintas variedades de trigos suaves [Magaña-Barajas *et al*, 2009].

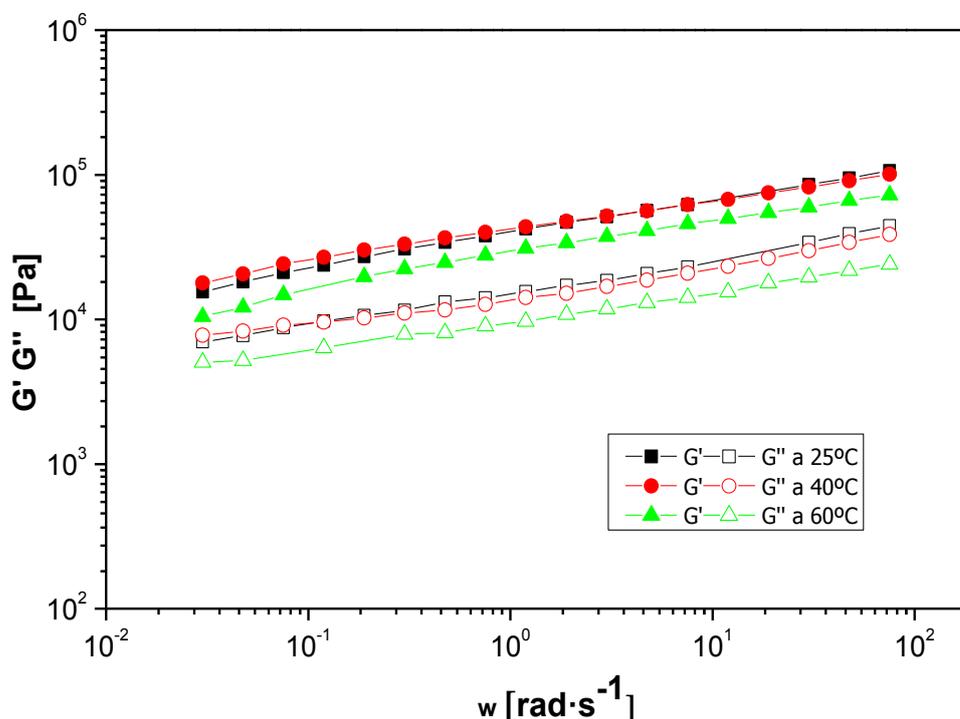


Figura 4.3 Evolución de los módulos de almacenamiento (G') y pérdidas (G''), con la frecuencia a diferentes temperaturas para la pulpa fresca de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.).

Por otra parte, los módulos viscoelásticos descienden ligeramente al aumentar la temperatura. En la Tabla 4.4 se muestran los valores de G' , G'' y de $\tan \delta$ de la pulpa fresca de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.), a frecuencias de 0,05; 1,2 y 30 rad s⁻¹, a diferentes temperaturas. Como se ha comentado, en todos los casos $G' > G''$, lo cual demuestra un comportamiento elástico relativo, que no se ve afectado por la temperatura, tal como demuestran los valores de la $\tan \delta$.

La $\tan \delta$ es una medida adimensional que compara la cantidad de energía perdida durante un ensayo oscilatorio con la cantidad de energía almacenada (G''/G'), e indica si predomina la propiedad elástica o viscosa [Mota y Ibarz, 2006]. Se observa en la Figura 4.4 que la $\tan \delta$ de la pulpa fresca de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) presenta un valor mínimo con

frecuencias intermedias y una evolución prácticamente idéntica, independientemente de la temperatura.

Tabla 4.4 Parámetros viscoelásticos de la pulpa fresca de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) a frecuencias de 0,05, 1,2, y 30 rad s⁻¹, a diferentes temperaturas.

	T(°C)	G'(Pa)	G''(Pa)	tan δ
ω: 0,05 rad s ⁻¹	25	18161	7736	0,426
	40	20651	8291	0,402
	60	12099	7736	0,456
ω: 1,2 rad s ⁻¹	25	23615	10643	0,369
	40	30104	10210	0,324
	60	19652	10643	0,313
ω: 30 rad s ⁻¹	25	94671	37282	0,396
	40	80995	29400	0,363
	60	54460	18186	0,342

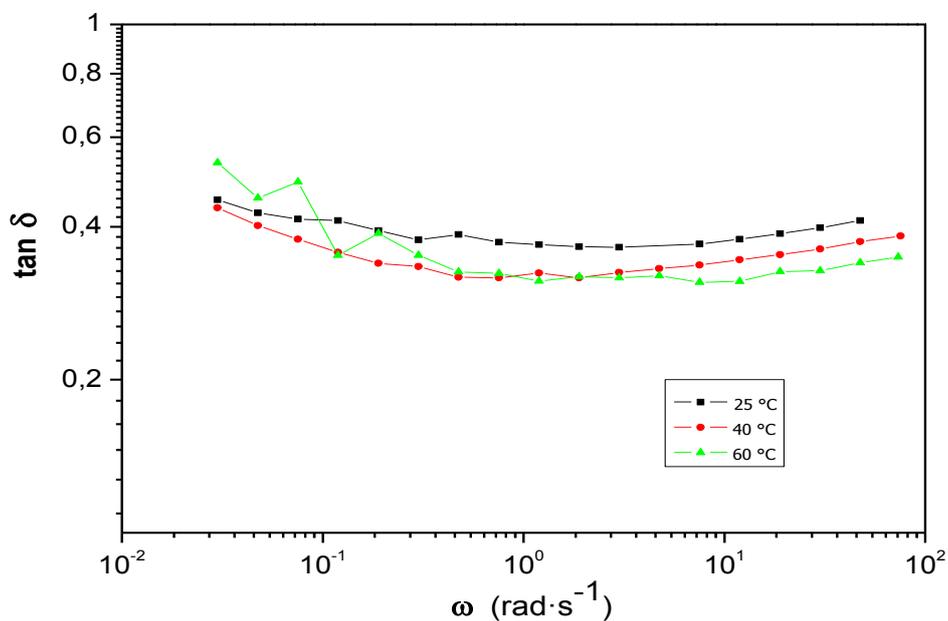


Figura 4.4 Tangente de ángulo de desfase (tan δ) en función de la frecuencia a diferentes temperaturas de la pulpa fresca de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.).

Así, el comportamiento viscoelástico lineal mostrado por la muestra de pulpa de borjón (*Borjón patinoi* Cuatrec.) es similar al observado en otras pulpas de frutas, como mango [Pelegri *et al.*, 2002; Branco *et al.*, 2003; Vidal *et al.*, 2004; Dak *et al.*, 2007], guayaba [Ferreira *et al.*, 2002; Medina y Pagano, 2003], cereza [Da Silva *et al.*, 2005] o membrillo [Mota y Ibarz, 2006]. Por otra parte, de forma análoga a lo que ocurre con la viscosidad, la respuesta viscoelástica de la pulpa de borjón (*Borjón patinoi* Cuatrec.) no está influenciada de forma significativa por la temperatura.

4.2 Caracterización de mermeladas de borjón con adición de diferentes concentraciones de pectina

La fabricación de mermeladas de borjón con propiedades fisicoquímicas, reológicas y sensoriales adecuadas y la difusión de estas propiedades, es una manera de poder aumentar la apreciación de esta fruta en otros mercados. La mermelada es un producto alimentario de humedad intermedia obtenido por la cocción de ingrediente de fruta mezclada con azúcar y otros ingredientes (conservante, colorantes o agentes aromatizantes) y se concentra hasta obtener la consistencia adecuada [Baker *et al.*, 2005]. La formulación debe contener no menos de 65% de sólidos solubles [INEN, 1988]. Pectina, azúcar, ácidos y agua están presentes aproximadamente en las proporciones siguientes: 0,5-1% de pectina añadida, 50-75% de azúcar, 1% de ácido y 33-38% de agua (en base de pulpa de fruta) [Lal *et al.*, 1998.]. Uno de los factores que afectan a la calidad de la formulación es el contenido de pulpa. En Ecuador, la legislación obliga a que las formulaciones de mermeladas se deban realizar con al menos un 45% en peso de la fruta original [INEN, 1988].

4.2.1 Parámetros fisicoquímicos

Los valores de los parámetros fisicoquímicos de las diferentes formulaciones de mermeladas analizadas, se presentan en la Tabla 4.5.

Puede observarse que las propiedades fisicoquímicas de las mermeladas artesanales de borjón resultaron muy similares a las mermeladas comerciales de melocotón y borjón tomadas como referencias.

Todas las mermeladas artesanales fueron procesadas para alcanzar un contenido en sólidos solubles de aproximadamente 65° Brix, que fue básicamente el mismo valor que se obtuvo para la mermelada comercial de melocotón. No obstante, este valor fue menor que el de la mermelada comercial de borjón. La mermelada de melocotón mostró el grado de humedad más alto, mientras que el pH y la acidez fueron similares en todos los casos.

Tabla 4.5 Parámetros fisicoquímicos de las mermeladas estudiadas.

Parámetro	Formulaciones de mermeladas					
	Mermelada comercial melocotón	Mermelada comercial borjón	Mermelada borjón (0,25% pectina)	Mermelada borjón (0,50% pectina)	Mermelada comercial (0,75% pectina)	Mermelada comercial (1,0% pectina)
Humedad (%)	38,15	28,23	28,03	32,49	32,18	32,74
Cenizas (%)	0,34	0,39	0,33	0,30	0,35	0,32
Sólidos solubles (°Brix a 20°C)	68	72	67	65	67	68
pH	3,16	3,16	3,10	3,11	3,10	3,14
Acidez titulable (% como ácido málico)	3,24	3,11	3,08	3,09	3,10	3,08

4.2.2 Caracterización reológica

4.2.2.1. Ensayos oscilatorios SAOS

La Figura 4.5. presenta la evolución de los módulos de almacenamiento (G') y pérdidas (G'') con la frecuencia, dentro de la región viscoelástica lineal, a tres temperaturas seleccionadas, para las muestras

de mermeladas de borjón formuladas con la adición de diferentes concentraciones de pectina. Estas formulaciones se comparan igualmente con las mermeladas comerciales de borjón y melocotón. En todos los casos, se encuentra un comportamiento típico de gel, caracterizado por un valor de G' superior a G'' en todo el rango de frecuencias estudiado [Gallegos y Franco, 1999].

Así, se observa una evolución potencial de G' (con una pendiente aproximadamente constante en el gráfico log-log) con la frecuencia, mientras que se determinó una tendencia a alcanzar valores constantes a bajas frecuencias, es decir una región plateau, para G'' . Similar comportamiento ha sido reportado para mermeladas de mango que contienen sacarosa o sorbitol [Basu *et al.*, 2011]. Ninguna de estas funciones viscoelásticas (ni tampoco G^*) pueden ser descritas en todo el rango de frecuencias mediante un modelo potencial, reportado por otros autores anteriormente [Subramanian *et al.*, 2006; Basu *et al.*, 2011; Gabriele *et al.*, 2001].

Por otra parte, las funciones viscoelásticas aumentaron con la concentración de pectina añadida. Se encontraron diferencias de más de una década en las mermeladas modificadas con 0,25% y 1,0%, de pectina añadida, sobre todo a bajas temperaturas.

Además, la dependencia de ambos módulos con la frecuencia para las formulaciones artesanales de mermeladas de borjón es aproximadamente la misma a la encontrada en la mermelada comercial de borjón, con valores muy similares de las funciones dinámicas en el caso de la formulación de mermelada que contiene 0,5% pectina, a 5°C de temperatura. Sin embargo, la mermelada que contiene 0,25% pectina es más parecida a la muestra de mermelada comercial por encima de 25°C (Figura 4.5.).

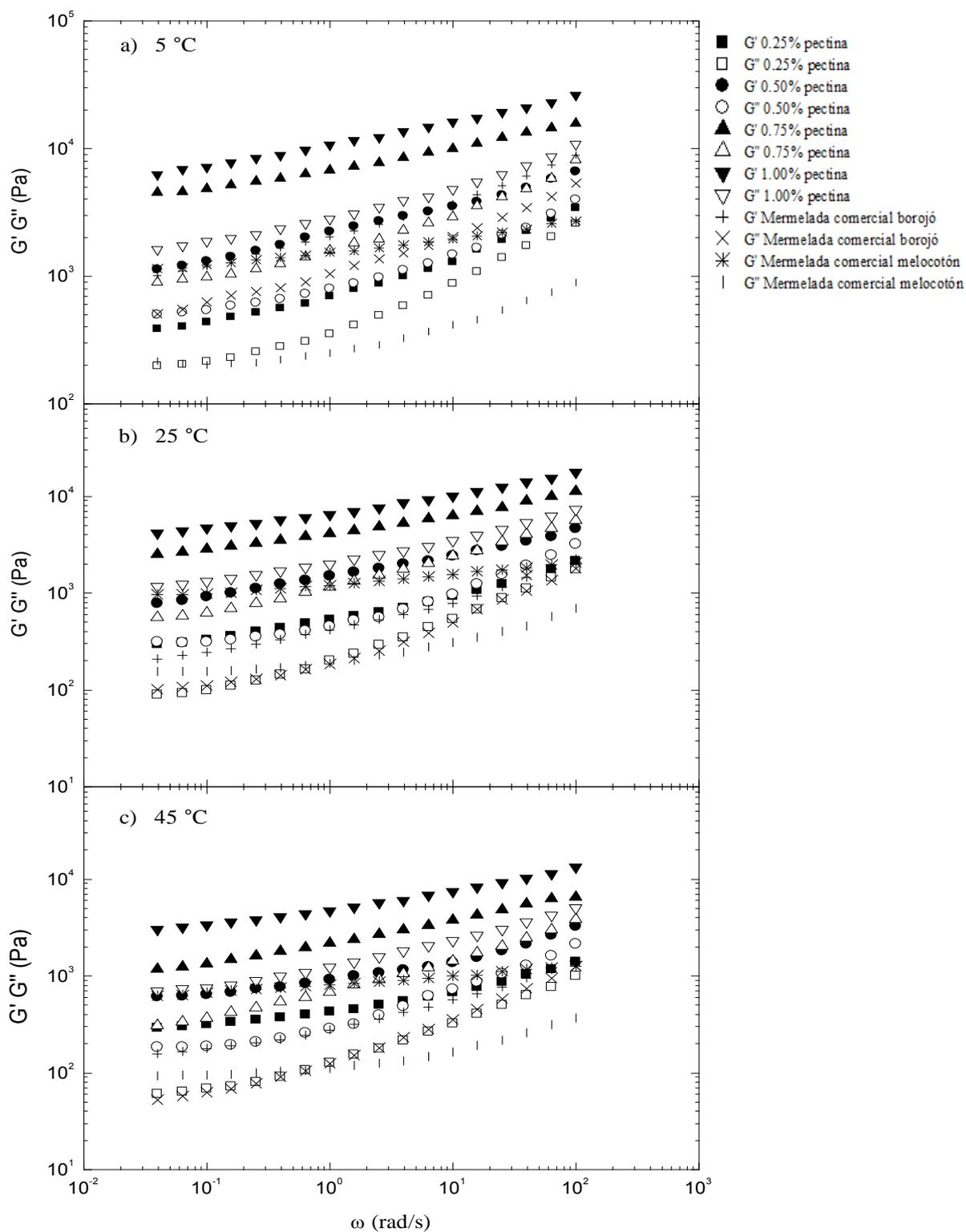


Figura 4.5 Dependencia de las funciones viscoelásticas con la frecuencia, para las diferentes formulaciones de mermeladas estudiadas, a temperaturas seleccionadas.

Esto significa que el efecto de la temperatura es mayor para la mermelada comercial de borajó. Un comportamiento muy diferente mostró la mermelada comercial de melocotón, la cual exhibe una dependencia de las funciones viscoelásticas con la frecuencia mucho más baja. Así, por ejemplo, los valores de G' para esta mermelada es similar a aquéllos obtenidos para la mermelada de borajó artesanal que contiene 0,5% de pectina en el rango de bajas frecuencias, pero similares a aquellos mostrados para la mermelada de borajó con 0,25% de pectina en el rango de altas frecuencias, independientemente de la temperatura (Figura 4.5.).

Además, la elasticidad relativa resulta ligeramente afectada por el contenido de pectina. Como se puede observar en Figura 4.6 la tangente del ángulo de desfase ($\tan \delta = G''/G'$) disminuye generalmente con el incremento en el contenido de pectina, especialmente a altas frecuencias. Sin embargo, todas las formulaciones de mermeladas artesanales exhibieron valores de $\tan \delta$ comprendidos entre los que se encontraron para ambas formulaciones comerciales.

El efecto de la temperatura sobre algunos parámetros reológicos de diferentes mermeladas se ha reportado previamente [Alvarez et al., 2006; Basu et al., 2007; Basu y Shivhare, 2010], aunque principalmente se ha centrado en el comportamiento de flujo viscoso.

Como se puede observar en la Figura 4.5 los valores de las funciones dinámicas disminuyen con el incremento de la temperatura. Como se mencionó anteriormente, el efecto de la temperatura parece ser diferente para las mermeladas de borajó elaboradas artesanalmente y la mermelada comercial. La influencia de la temperatura se ilustra mucho mejor en las Figuras 4.7 a 4.11 para mermeladas de borajó de formulación artesanal (0,25, 0,50, 0,75 y 1,0% de pectina añadida) y la mermelada comercial, respectivamente.

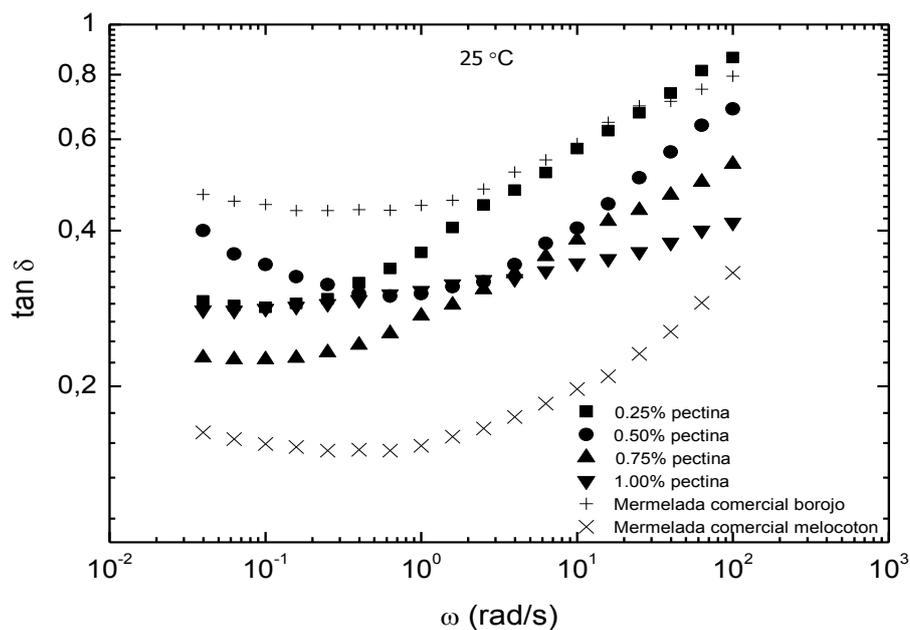


Figura 4.6 Evolución de la tangente de ángulo de desfase ($\tan \delta$) con la frecuencia para diferentes formulaciones de mermeladas estudiadas a 25 °C.

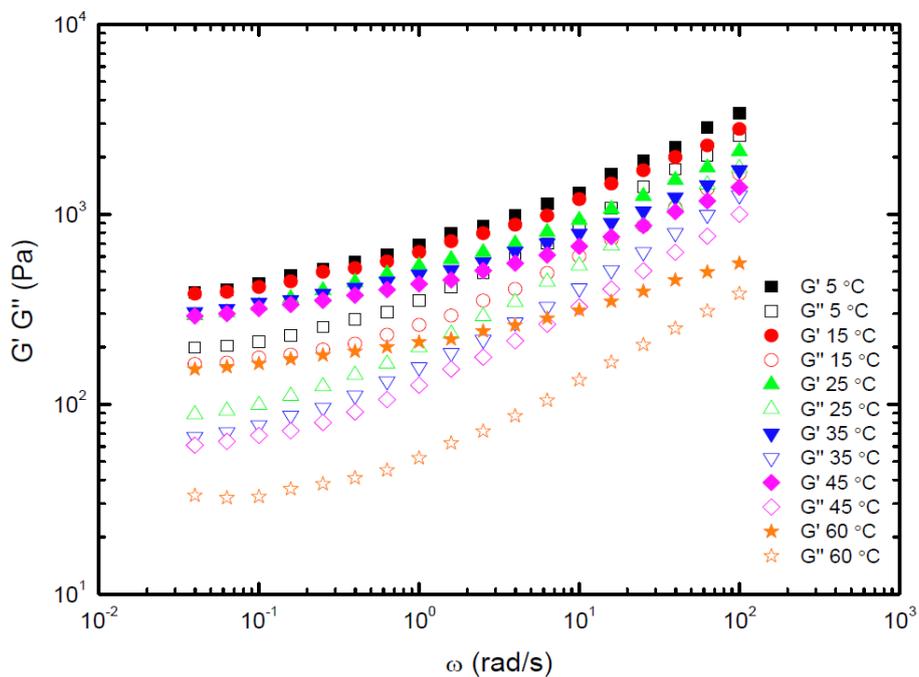


Figura 4.7 Dependencia de las funciones dinámicas con la frecuencia, en función de la temperatura, para la mermelada de borojó con 0,25% de pectina.

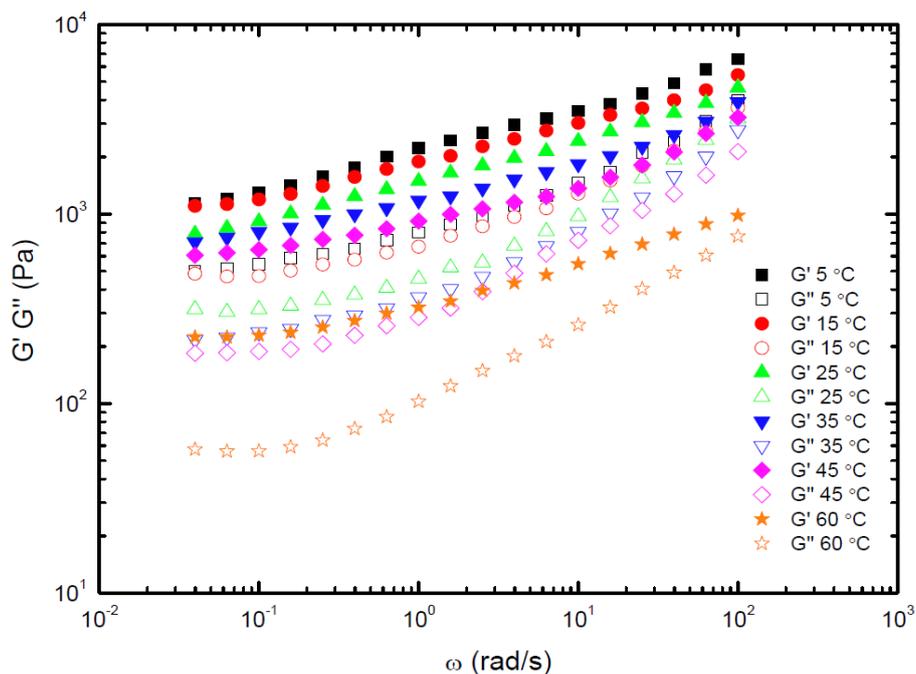


Figura 4.8 Dependencia de las funciones dinámicas con la frecuencia, en función de la temperatura, para la mermelada de borjón con 0,50% de pectina.

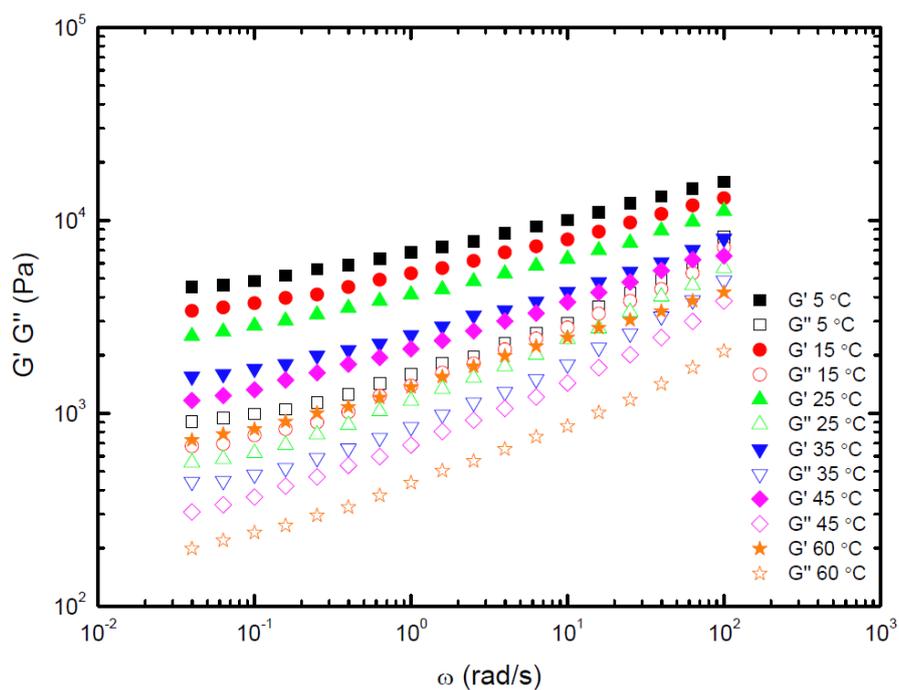


Figura 4.9 Dependencia de las funciones dinámicas con la frecuencia, en función de la temperatura, para la mermelada de borjón con 0,75% de pectina.

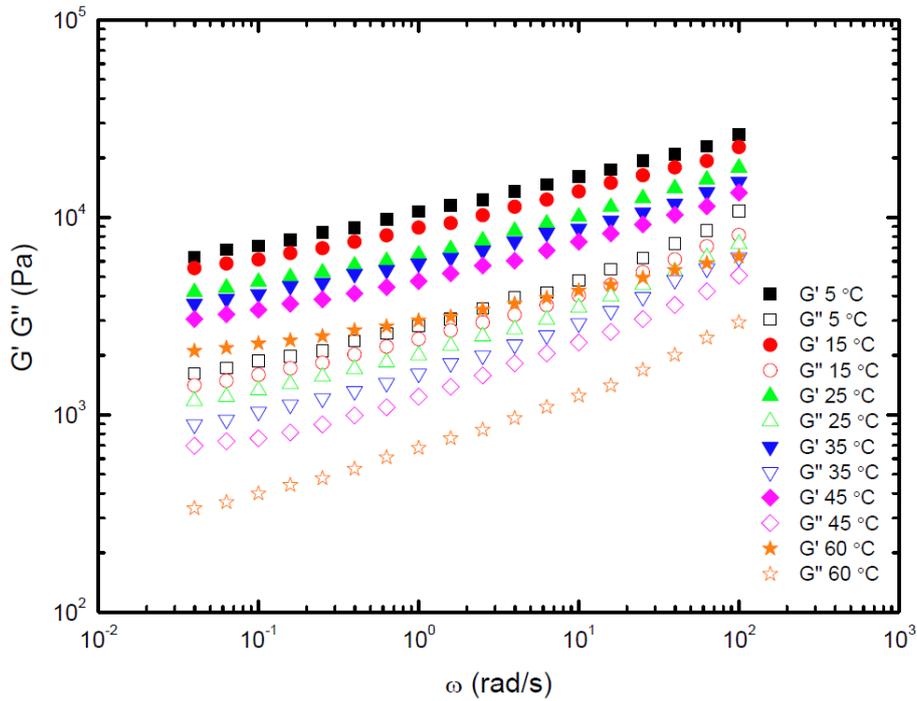


Figura 4.10 Dependencia de las funciones dinámicas con la frecuencia, en función de la temperatura, para la mermelada de borjój con 1,0 % de pectina.

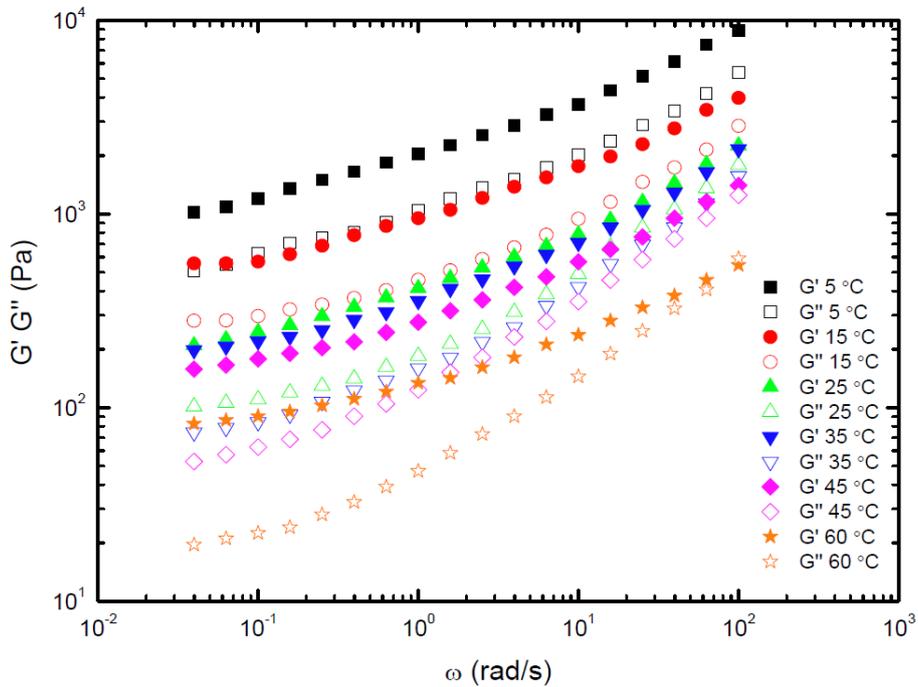


Figura 4.11 Dependencia de las funciones dinámicas con la frecuencia, en función de la temperatura, para la mermelada comercial de borjój.

Como puede verse, las funciones viscoelásticas de la mermelada comercial de borjój se encuentran más afectadas por la temperatura que en las mermeladas de formulación artesanal. Por el contrario, se encontró una dependencia térmica muy baja para la mermelada comercial de melocotón (Figura 4.12).

Se ha seleccionado el valor de G' a 1 rad/s para cuantificar la influencia de la temperatura mediante el uso de una ecuación tipo Arrhenius:

$$G'_{[1 \text{ rad/s}]} = A_{G'} \cdot e^{\frac{E_{a,G'}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T}\right)} \quad (\text{IV}, 2)$$

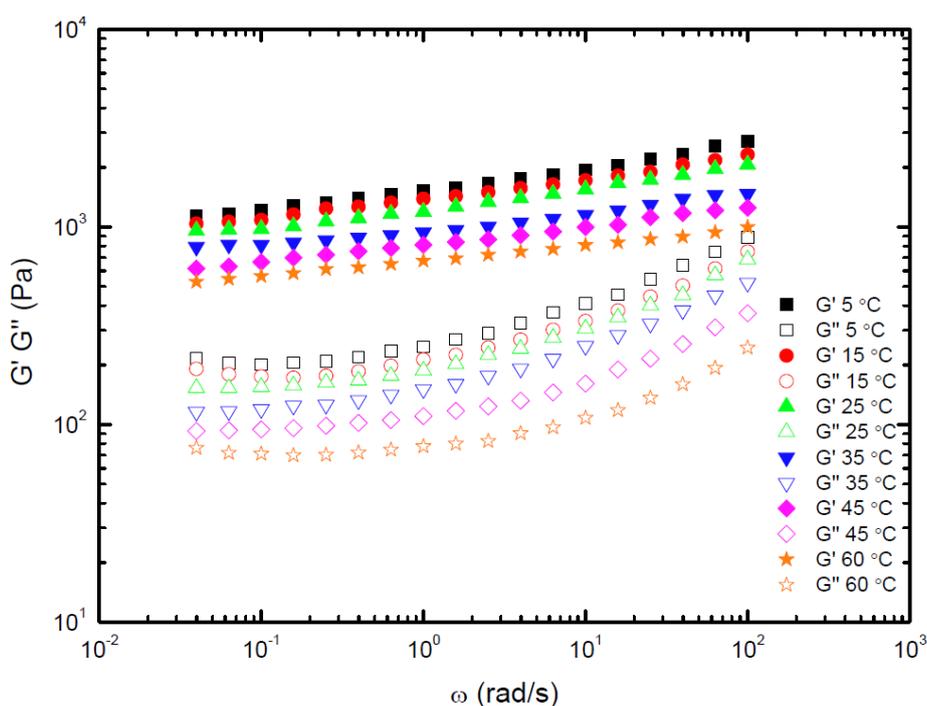


Figura 4.12 Dependencia de las funciones dinámicas con la frecuencia, en función de la temperatura, para la mermelada comercial de melocotón.

donde, $E_{a,G'}$ es un parámetro que evalúa la dependencia térmica, similar a la energía de activación (J/mol), R es la constante de los gases (8.314 J/mol K), T es la temperatura absoluta (K), y $A_{G'}$ es el factor pre-exponencial (Pa). La ecuación IV,2 describe bien ($R^2 > 0,98$) los valores

experimentales de G' , en el rango de temperaturas estudiado para la mayoría de las muestras (Figura 4.13). Sin embargo, las formulaciones artesanales con las menores concentraciones de pectina (0,25 y 0,5%) se desvían de la evolución de Arrhenius por encima de 45°C, mostrando una mayor dependencia térmica. La Tabla 4.6 muestra los valores de energía de activación para todas las muestras estudiadas.

Como se discutió previamente, la mermelada comercial de borjón muestra una mayor dependencia de las funciones viscoelásticas con la temperatura, con valores de $E_{a,G}$ significativamente mayores que el resto de muestras analizadas. El valor más bajo de $E_{a,G}$ se obtuvo para la formulación artesanal que contiene la cantidad más baja de pectina añadida, seguido por la mermelada comercial de melocotón.

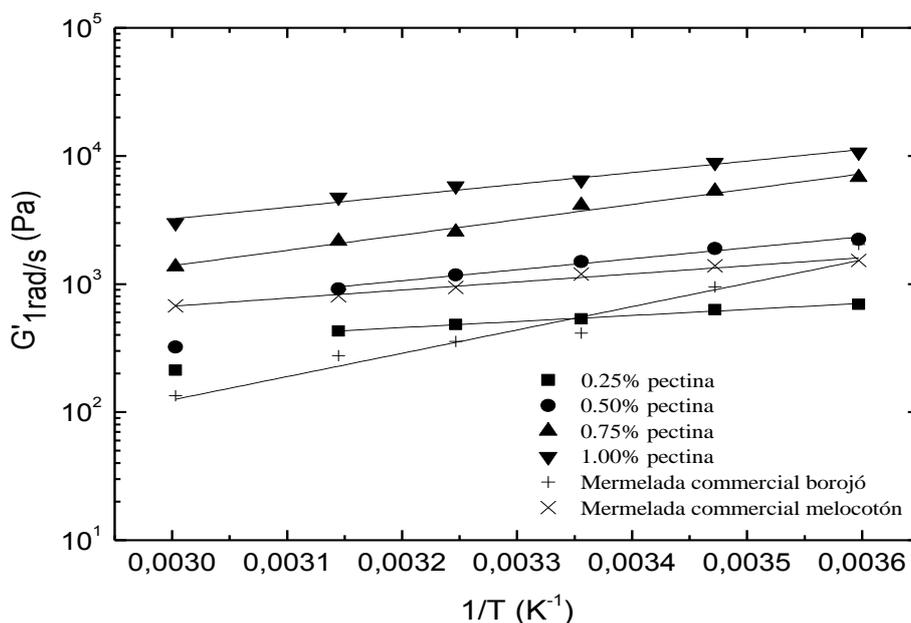


Figura 4.13 Variación de los valores de G' , a 1 rad/s, con la temperatura y ajuste a la ecuación de Arrhenius (líneas continuas), para las diferentes formulaciones de mermeladas estudiadas.

Tabla 4.6. Valores de Energía de Activación obtenidos del ajuste de los datos experimentales a las ecuaciones [IV,2], [IV,4] y [IV,5] para las diferentes mermeladas estudiadas.

Muestra	$E_{a,G'}$ (kJ/mol)	$E_{a,\tau}$ (kJ/mol)	$E_{a,k}$ (kJ/mol)
Mermelada de borojón (0,25% pectina)	9,04	23,37	29,08
Mermelada de borojón (0,50% pectina)	16,45	32,26	27,88
Mermelada de borojón (0,75% pectina)	22,94	32,73	26,87
Mermelada de borojón (1,00% pectina)	17,14	27,86	30,27
Mermelada comercial de borojón	35,92	18,65	24,07
Mermelada comercial de melocotón	12,19	7,84	31,78

En general, la dependencia térmica de ambas funciones dinámicas, G' y G'' , parece aumentar ligeramente con el contenido de pectina. Sin embargo, la $\tan \delta$ de las mermeladas artesanales aumentó ligeramente con la temperatura, cuando la concentración de pectina añadida es superior a 0,75% y por el contrario, disminuye con el aumento de la temperatura, especialmente a bajas frecuencias, para concentraciones de pectina más bajas (ver Figura 4.13).

Este resultado puede explicarse atendiendo a los efectos de la concentración de pectina sobre el comportamiento de los biopolímeros durante la gelificación térmica inducida.

Como reportó Tsoga *et al.* [2004], durante el calentamiento de geles de pectina se produce un equilibrio entre la formación de asociación hidrófoba y la disociación de uniones hidrófilas. Este equilibrio es altamente dependiente de la concentración de pectina y del pH [Agoub *et al.*, 2009].

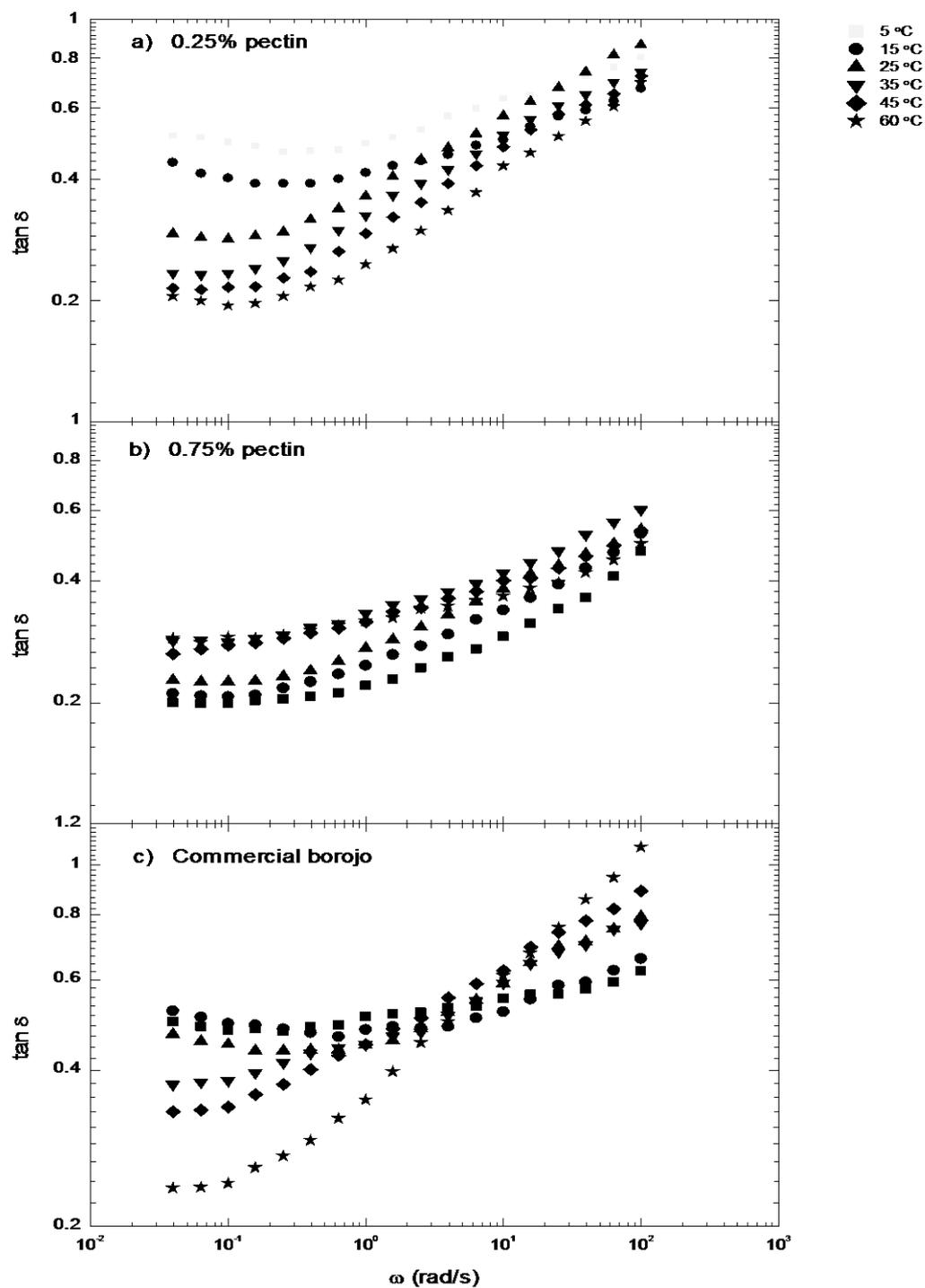


Figura 4.14 Evolución de la tangente del ángulo de desfase ($\tan \delta$) con la frecuencia, en función de la temperatura, para formulaciones de mermeladas seleccionadas.

Así pues, para bajas concentraciones de pectina, o pH superior al pK_0 , las condiciones menos favorables para las asociaciones intermoleculares, se encontró que un aumento en la temperatura produce una disminución inicial en G'' , por debajo de 80°C , mientras que G' permanece casi constante [Agoub *et al.*, 2009; el Haghghi *et al.*, 2011].

El mismo efecto se observó sobre la $\tan \delta$ a bajas frecuencias para la mermelada comercial de borjón aunque, en este caso, esta tendencia se invirtió a altas frecuencias (Figura 4.14c), lo cual indica un cambio en la dependencia de G' y G'' con la frecuencia al aumentar la temperatura. En este sentido, en esta formulación comercial, puede observarse claramente a altas temperaturas una tendencia a un cruce entre ambas funciones dinámicas (Figura 4.11). Por otro lado, la mermelada comercial de melocotón presenta valores muchos más bajos de la tangente de pérdidas, prácticamente no afectados por la temperatura, semejantes a los encontrados en las mermeladas de borjón con altos contenidos de pectina.

4.2.2.2 Comportamiento de flujo viscoso

Como previamente han reportado algunos autores [Carbonell *et al.*, 1991; Pelegrine *et al.* 2002; Alvarez *et al.*, 2006; Basu *et al.*, 2010], las mermeladas tienen un comportamiento típicamente pseudoplástico, asociado a una tendencia a alcanzar un valor de esfuerzo umbral.

La Figura 4.15 muestra la comparación de curvas de flujo viscoso obtenidas utilizando los modos de esfuerzo controlado y deformación controlada para una muestra seleccionada. Generalmente, como puede observarse, el modo de deformación controlada permite una distribución más uniforme del esfuerzo en el rango estudiado, que no puede obtenerse en el modo de esfuerzo controlado.

Este comportamiento de flujo se ha descrito frecuentemente mediante el modelo de Herschel-Bulkley [Herschel y Bulkley, 1926].

$$\tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (\text{IV, 3})$$

donde τ_0 es el esfuerzo umbral y k y n , los índices de consistencia y flujo, respectivamente.

La Figura 4.16 muestra la curva del esfuerzo vs velocidad de deformación para las diferentes muestras de mermeladas de borjón estudiadas, a 25°C, y los ajustes al modelo de Herschel-Bulkley ($R^2 > 0,994$). Los parámetros de Herschel-Bulkley en función de la temperatura se presentan en la Tabla 4.7.

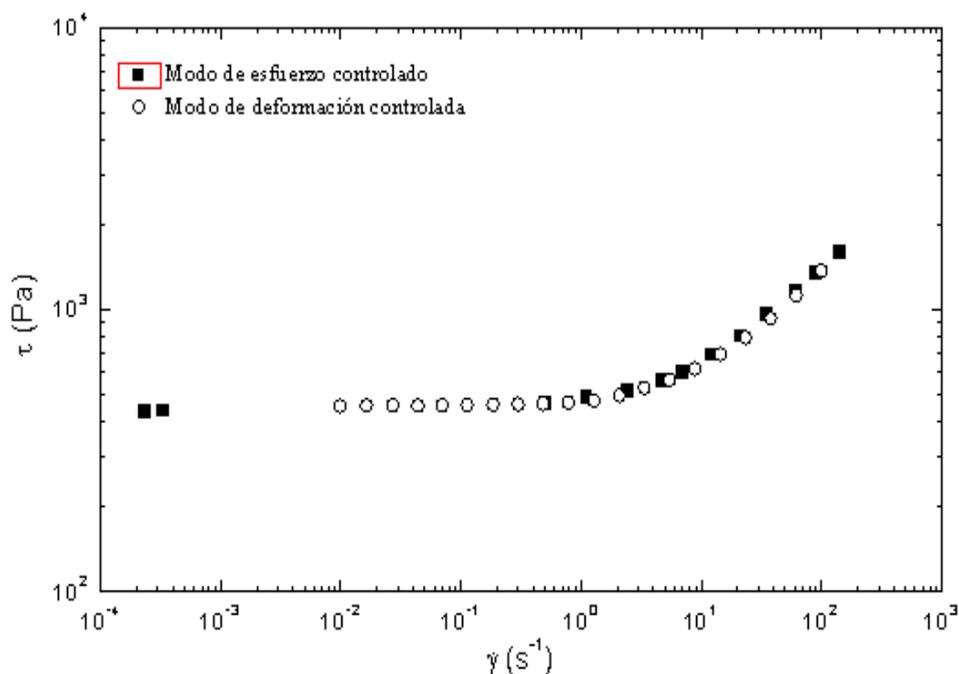


Figura 4.15 Comparación de mediciones de flujo viscoso utilizando el reómetro de deformación controlada Rheoscope y el reómetro de esfuerzo controlado Physica (en el modo de deformación controlada), para mermelada de borjón con un 1,00% de adición de pectina.

Como se puede observar en la Figura 4.16, el comportamiento de flujo de las mermeladas artesanales de borjón es cualitativamente similar al encontrado en la mermelada comercial de borjón y como se esperaba la viscosidad aparente aumenta con la concentración de pectina.

Además, los valores de la viscosidad de la mermelada comercial de borjón resultaron similares a los obtenidos para las mermeladas artesanales de borjón con bajas concentraciones de pectina (0,25 y 0,5% de pectina añadida).

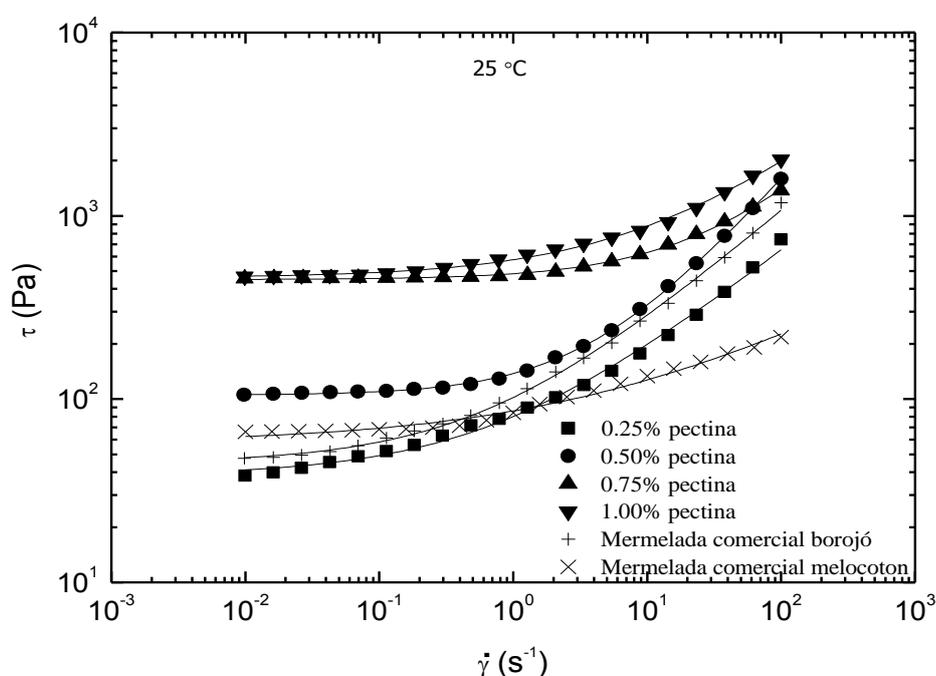


Figura 4.16 Curvas de flujo viscoso y ajustes al modelo de Herschel-Bulkley (lineas sólidas) para las diferentes formulaciones de mermeladas estudiadas, a 25°C.

La mermelada comercial de melocotón de referencia también mostró valores de esfuerzo similares a bajas y moderadas velocidades de deformación, pero se desvía del resto a altas velocidades de cizalla, como consecuencia de un índice de flujo más bajo (Tabla 4.7).

Tabla 4.7 Parámetros del modelo de Herschel-Bulkley para las diferentes mermeladas estudiadas en función de la temperatura.

Muestra	Temperatura (°C)	τ_0 (Pa)	k (Pa s ⁿ)	N
Mermelada de borjón (0.25% pectina)	5	114,42	61,07	0,64
	15	51,52	54,54	0,60
	25	38,20	42,10	0,58
	35	28,70	25,98	0,63
	45	25,84	14,26	0,68
	60	18,79	8,67	0,72
Mermelada de borjón (0.50% pectina)	5	275,24	68,53	0,84
	15	176,82	47,56	0,82
	25	105,06	32,89	0,83
	35	69,11	20,04	0,83
	45	46,65	14,58	0,79
	60	28,34	10,01	0,76
Mermelada de borjón (0.75% pectina)	5	1012,19	96,24	0,71
	15	647,86	55,64	0,67
	25	449,15	34,31	0,72
	35	299,16	32,26	0,71
	45	173,62	19,74	0,78
	60	98,43	13,16	0,75
Mermelada de borjón (1.00% pectina)	5	991,90	155,58	0,61
	15	666,74	123,41	0,61
	25	459,68	116,27	0,56
	35	332,66	95,41	0,55
	45	180,11	38,75	0,65
	60	128,26	16,89	0,70
Mermelada comercial de borjón	5	93,75	80,45	0,66
	15	56,54	64,06	0,65
	25	44,77	57,43	0,63
	35	37,79	50,90	0,62
	45	29,39	22,10	0,59
	60	23,23	14,74	0,63
Mermelada comercial de melocotón	5	90,00	49,72	0,40
	15	58,16	35,03	0,39
	25	57,69	28,52	0,39
	35	53,53	11,37	0,60
	45	48,69	8,68	0,59
	60	47,30	6,07	0,56

Así, como puede verse en la Tabla 4.7, los valores de τ_0 en ambas formulaciones de mermeladas comerciales están generalmente,

comprendidos entre los valores obtenidos para las mermeladas artesanales de borjón que contienen 0,25 y 0,5% de pectina añadida.

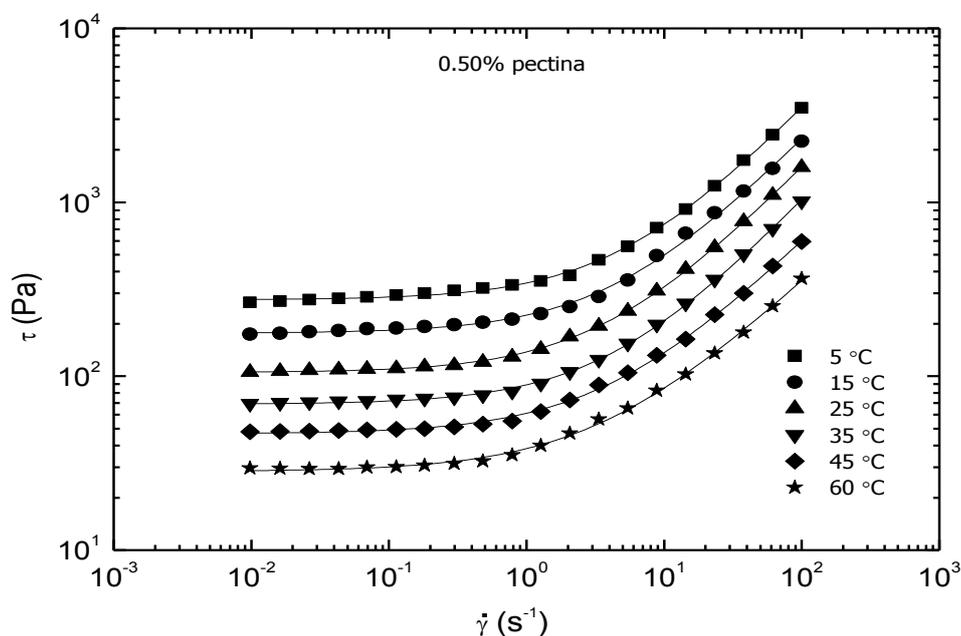


Figura 4.17 Curvas de flujo viscoso y ajustes al modelo de Herschel-Bulkley (líneas sólidas) en función de la temperatura para una mermelada de borjón artesanal que contiene 0,50% de pectina añadida.

De igual modo, los valores de k son también comparables a estas mermeladas artesanales. Por el contrario, se encontraron valores mucho más altos de τ_0 y de viscosidad, en el rango de velocidad de deformación estudiado, para las mermeladas artesanales que contienen 0,75 o 1,0% de pectina añadida.

Además, como se ilustra en la Figura 4.17 para una formulación de mermelada artesanal seleccionada, los valores de la viscosidad aparente (o del esfuerzo) disminuyeron al aumentar la temperatura pero, sin embargo, la dependencia de la velocidad de deformación no se modifica significativamente.

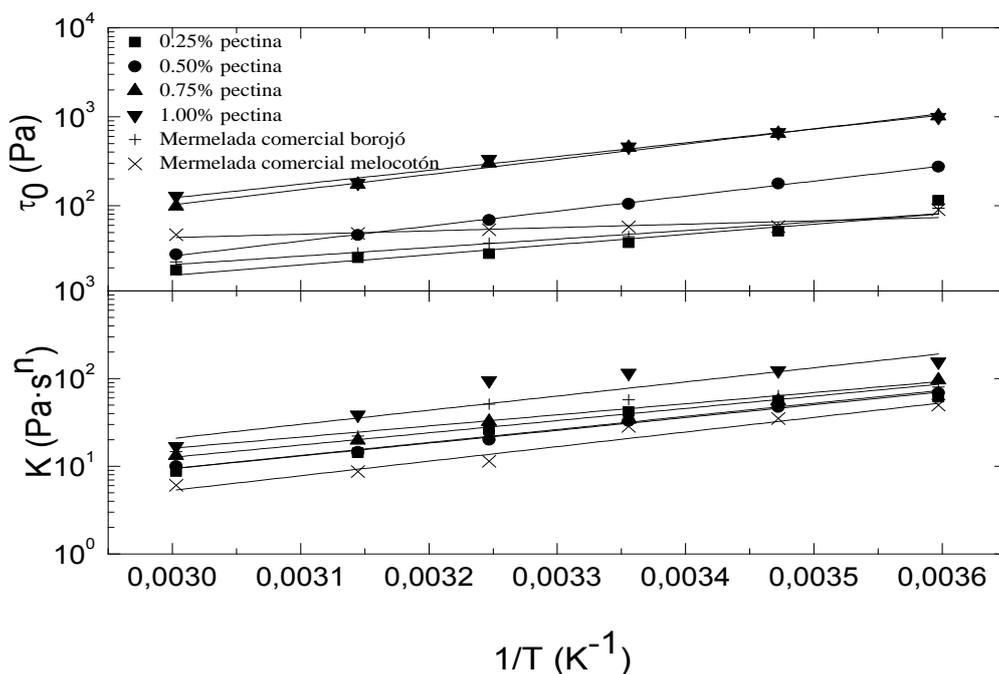


Figura 4.18 Variación de a) esfuerzo umbral y b) índice de consistencia con la temperatura, y ajuste Arrhenius (líneas continuas), para las diferentes formulaciones de mermeladas estudiadas.

Por lo tanto, como se puede observar en la Tabla 4.7, los valores de τ_0 y k disminuyen al aumentar la temperatura, pero, los valores de n no muestran ninguna variación sistemática con la temperatura.

De manera similar a lo propuesto anteriormente para G' , se han utilizado dos relaciones tipo Arrhenius ($R^2 > 0.989$) para cuantificar la influencia de la temperatura en ambos parámetros, τ_0 y k (Figura 4.15):

$$\tau_0 = A_\tau \cdot e^{\frac{E_{a,\tau}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T}\right)} \quad (\text{IV, 4})$$

$$k = A_k \cdot e^{\frac{E_{a,k}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T}\right)} \quad (\text{IV, 5})$$

donde, en este caso, $E_{a,\tau}$ y $E_{a,k}$ son las energías de activación (J/mol) para el esfuerzo umbral e índice de consistencia, respectivamente, y A_τ y A_k son

los parámetros pre-exponenciales (P_a). Los valores de energía de activación obtenidos se presentan en la Tabla 4.6. Similarmente a lo previamente discutido para las funciones viscoelásticas lineales, los valores más bajos de $E_{a,\tau}$ se obtuvieron para la formulación artesanal que contiene la concentración más baja de pectina agregada, en este caso, comparable al valor encontrado para la mermelada comercial de borjón.

Sin embargo, no se obtuvieron valores de $E_{a,\tau}$ muy diferentes para las formulaciones con mayor concentración de pectina. El menor valor de $E_{a,\tau}$ correspondió a la mermelada comercial de melocotón, lo cual indica una baja susceptibilidad térmica en este parámetro. No obstante, no hay diferencias importantes en los valores de $E_{a,k}$ obtenidos a partir del ajuste a la ecuación (IV,5) para todas las muestras estudiadas (Tabla 4.6), estando en este caso los valores correspondientes a las mermeladas estudiadas comprendidos entre los valores encontrados para ambas mermeladas comerciales.

4.2.3 Evaluación sensorial

Cada una de las diferentes formulaciones fue evaluada por el panel semientrenado de veinte catadores. Los resultados promedio por mermelada para cada una de las cinco variables sensoriales, así como la comparación de medias (Tukey $p \geq 0,05$) de la evaluación sensorial de cada uno de los atributos estudiados se presentan en la Tabla 4.8.

En todos los atributos sensoriales (sabor, olor, consistencia, adhesividad y aspecto general), la prueba de Tukey mostró para un nivel de $p \geq 0,05$, que no existieron diferencias significativas entre las diferentes muestras, incluyendo el testigo (Tabla 4.8).

Tabla 4.8 Promedios de la evaluación sensorial de mermeladas de borjón

MUESTRA	SABOR	OLOR	CONSISTENCIA	ADHESIVIDAD	ASPECTO GENERAL
0	2,97 ^a	3,96 ^a	5,08 ^a	5,76 ^a	4,58 ^a
1	4,50 ^a	4,42 ^a	4,11 ^a	4,69 ^a	3,99 ^a
2	4,52 ^a	4,42 ^a	3,31 ^a	3,79 ^a	3,89 ^a
3	3,74 ^a	4,16 ^a	3,61 ^a	3,82 ^a	3,80 ^a
4	4,22 ^a	4,71 ^a	4,44 ^a	3,87 ^a	4,16 ^a
\bar{x}	4,00	4,33	4,11	4,38	4,08
CV	37,41	32,91	36,03	36,10	33,96

Letras diferentes en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas $p \leq 0$.

0: muestra comercial (testigo)

1: mermelada artesanal 0,25 % pectina.

2: mermelada artesanal 0,50 % pectina.

3: mermelada artesanal 0,75 % pectina.

4: mermelada artesanal 1,00 % pectina.

\bar{x} : media

CV: coeficiente de variación

Para el atributo sabor, las muestras con promedios superiores, incluyendo el testigo (muestra comercial), fueron 2, 1 y 4, con promedios de 4,52, 4,50 y 4,22, respectivamente. La muestra que presentó el promedio más bajo en la escala sensorial fue la mermelada comercial con un promedio de 2,97.

Para el atributo olor, las muestras con promedios superiores fueron 4, 1 y 2, con promedios de 4,71; 4,42 y 4,42. La muestra que presentó el promedio más bajo en la escala sensorial fue nuevamente la muestra testigo, con un promedio de 3,96.

Para el atributo consistencia, las muestras con promedios superiores fueron 0, 4 y curiosamente la 1, con promedios de 5,08; 4,44 y 4,11, en ese orden. Como era de esperar, exceptuando la muestra 1, el panel de catadores, valoró el atributo consistencia de forma creciente de acuerdo al contenido en pectina de las mermeladas modelo.

Para el atributo adhesividad, las mermeladas con mejor valoración fueron la 0 y la 1, con promedios de 5,76 y 4,69 respectivamente. El resto de muestras fueron valoradas de forma muy similar.

Para el atributo aspecto general, las muestras más valoradas fueron la 0 y la 4, con promedios de 4,58 y 4,16, respectivamente. La muestra que presentó el promedio más bajo en la escala sensorial fue la 3, con un promedio de 3,80.

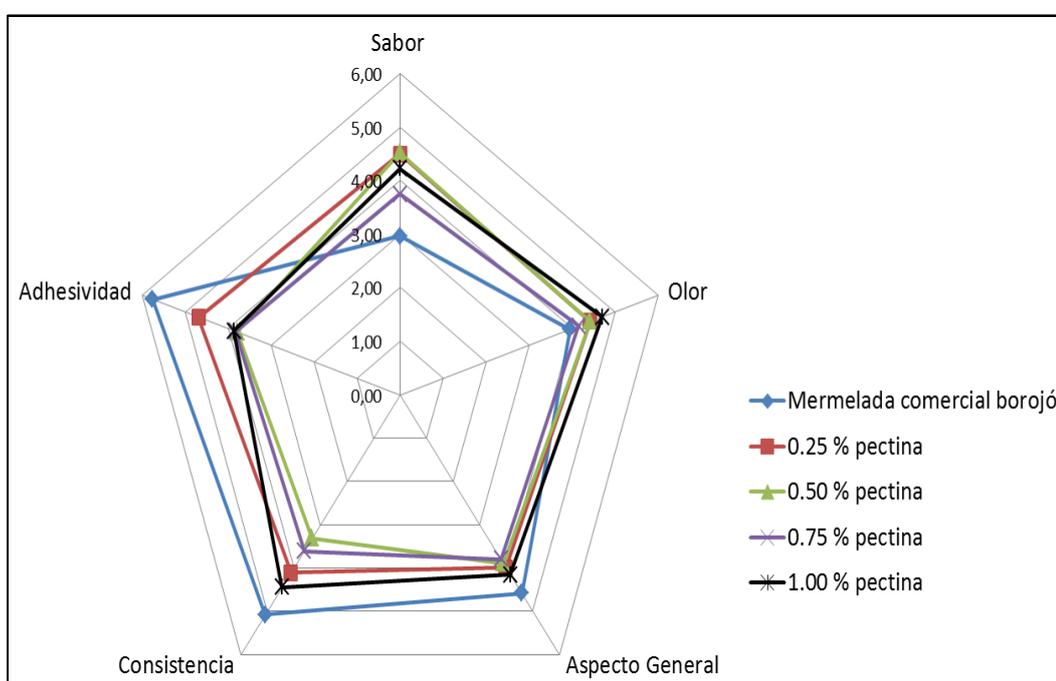


Figura 4.19 Valores medios de la valoración sensorial para cada una de las muestras de mermeladas de borrojó en cada atributo evaluado.

En la Figura 4.16, se muestra en una escala hedónica de 0 a 6 los valores medios de las formulaciones valoradas por el panel sensorial.

Como se observa en el gráfico, sobre la base de los resultados obtenidos y el análisis de los mismos, se concluye que la muestra que más se asemeja al testigo (mermelada comercial), en cuanto a aspecto general y consistencia es la muestra 4 que corresponde a la mermelada artesanal de

borojó con adición de 1,00% de pectina, mientras que la muestra 1, que corresponde a la mermelada artesanal de borojó con adición 0,25% de pectina, se asemeja más al testigo en cuanto al atributo adhesividad. En cambio, la muestra 3, que corresponde a la mermelada artesanal de borojó con adición de 0,75% de pectina, se asemeja al testigo en cuanto a los atributos olor y sabor.

Teniendo en cuenta la mayor cantidad de atributos sensoriales similares puede decirse que la muestra 4 (1,00% de pectina) es la que más se asemeja al testigo, por lo cual se requiere realizar una prueba discriminativa, recomendándose la prueba triangular.

En consecuencia, se evaluó la diferencia de atributos sensoriales existente entre la mermelada comercial y la muestra 4 con 1,00 % de adición de pectina, realizándose una prueba triangular. Se evaluaron las muestras con un panel integrado por 20 panelistas semientrenados y familiarizados con la prueba del triángulo.

El total de juicios fue de 20 y las respuestas correctas fueron 13, por tanto, se concluye que no hay diferencias significativas entre ambas muestras de mermelada para un nivel de significación del 99%.

4.3 Caracterización de batidos de leche de soya con borojó con diferentes concentraciones de sólidos solubles

4.3.1 Parámetros fisicoquímicos

Los valores de los parámetros fisicoquímicos de los batidos de leche de soya con borojó, se presentan en la Tabla 4.9. Las propiedades fisicoquímicas de los batidos artesanales de leche de soya con borojó

resultaron muy similares al batido comercial de leche de soya con borjón de 10 °Brix, tomado como referencia.

Tabla 4.9 Parámetros fisicoquímicos de las formulaciones de batidos estudiados.

Parámetro	Formulaciones de batidos de leche de soya con borjón					
	Batido comercial	Batidos artesanales				
Sólidos solubles (°Brix, a 20°C)	10	8	12	14	16	18
pH	6,45	6,12	6,16	6,54	6,28	6,25
Acidez titulable (% como ácido málico)	3,24	3,22	3,34	3,30	3,31	3,33

4.3.2 Caracterización reológica

4.3.2.1 Comportamiento de flujo viscoso

En las Figuras 4.20 a 4.25 se presentan las curvas de flujo de los diferentes batidos artesanales y de un batido comercial de leche de soya con borjón, a diferentes temperaturas. En todos los casos, se observó un comportamiento pseudoplástico, con una caída potencial de la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla, que puede describirse satisfactoriamente mediante la ley de la potencia ($R^2 > 0,995$), expresada como:

$$\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \tag{IV, 6}$$

donde, k y n , los índices de consistencia y flujo, respectivamente.

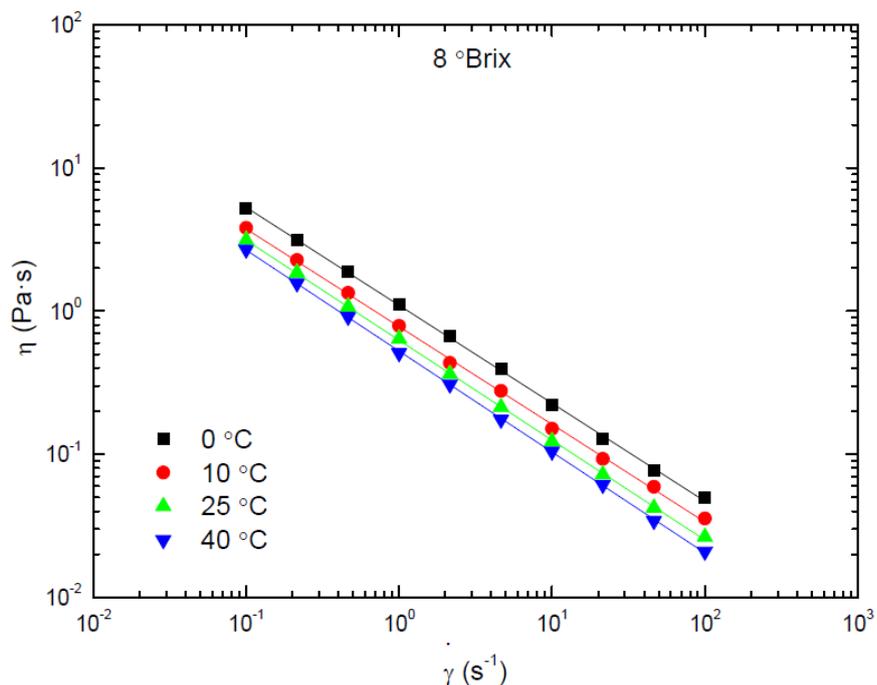


Figura 4.20 Curvas de flujo del batido artesanal de leche de soja con borjój con 8 °Brix, a diferentes temperaturas.

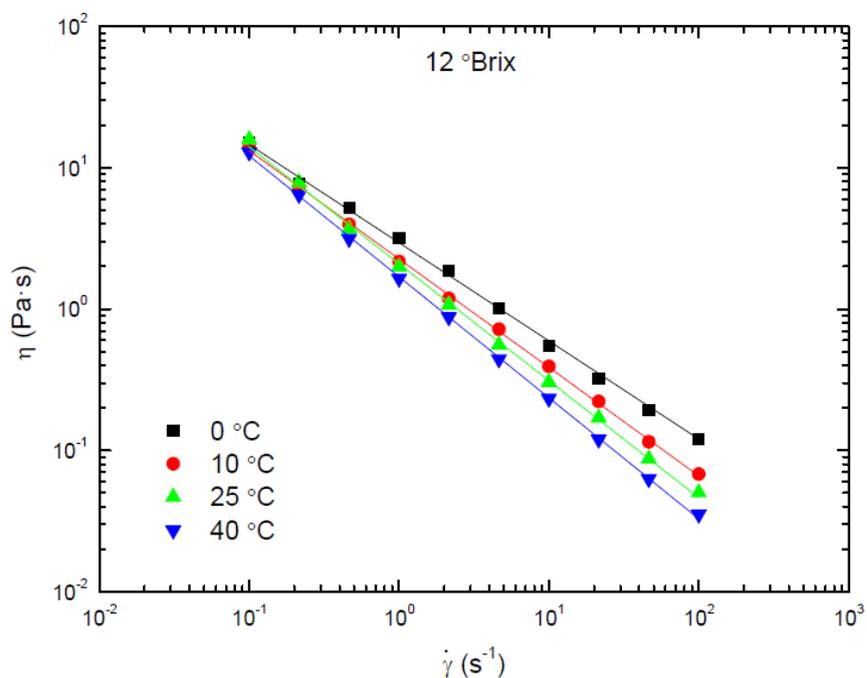


Figura 4.21 Curvas de flujo del batido artesanal de leche de soja con borjój con 12 °Brix, a diferentes temperaturas.

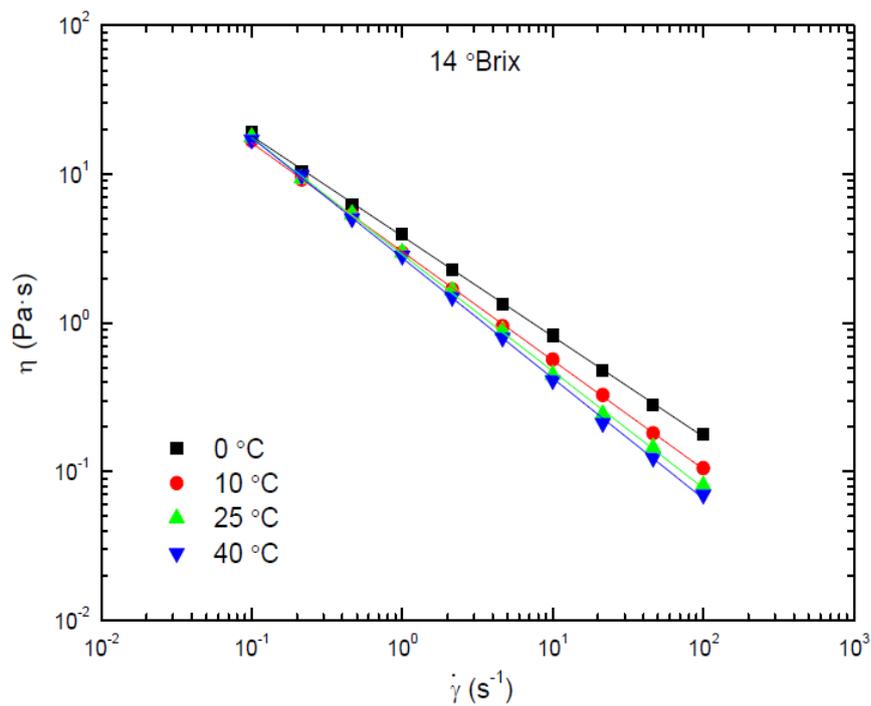


Figura 4.22 Curvas de flujo del batido artesanal de leche de soya con borjón con 14 °Brix, a diferentes temperaturas.

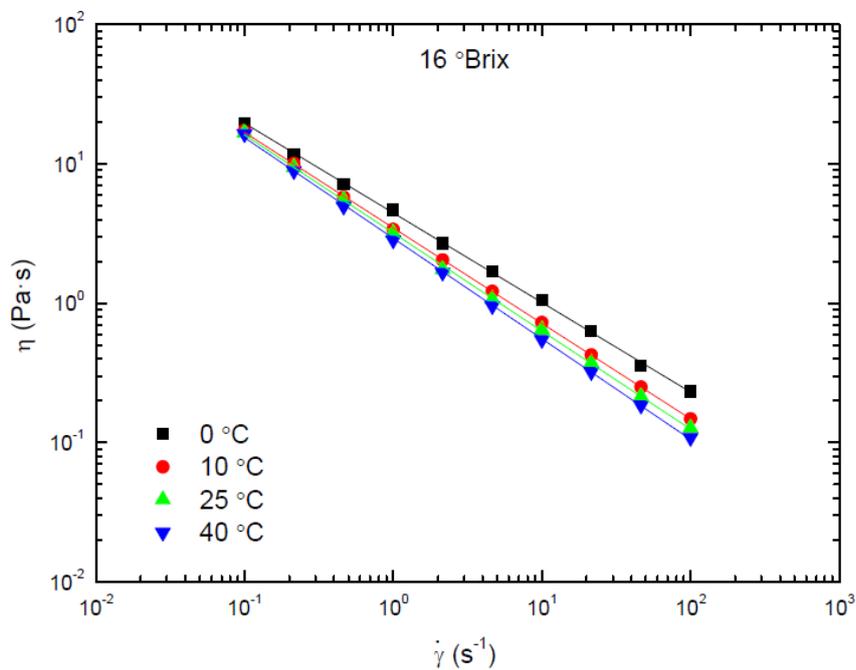


Figura 4.23 Curvas de flujo del batido artesanal de leche de soya con borjón a 16 °Brix, a diferentes temperaturas.

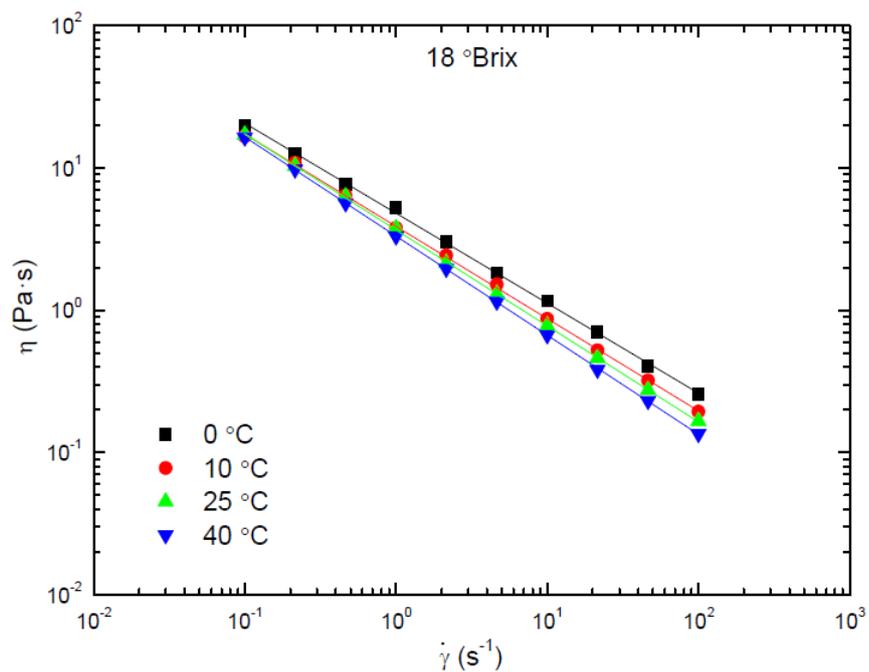


Figura 4.24 Curvas de flujo del batido artesanal de leche de soja con borjón con 16 °Brix, a diferentes temperaturas.

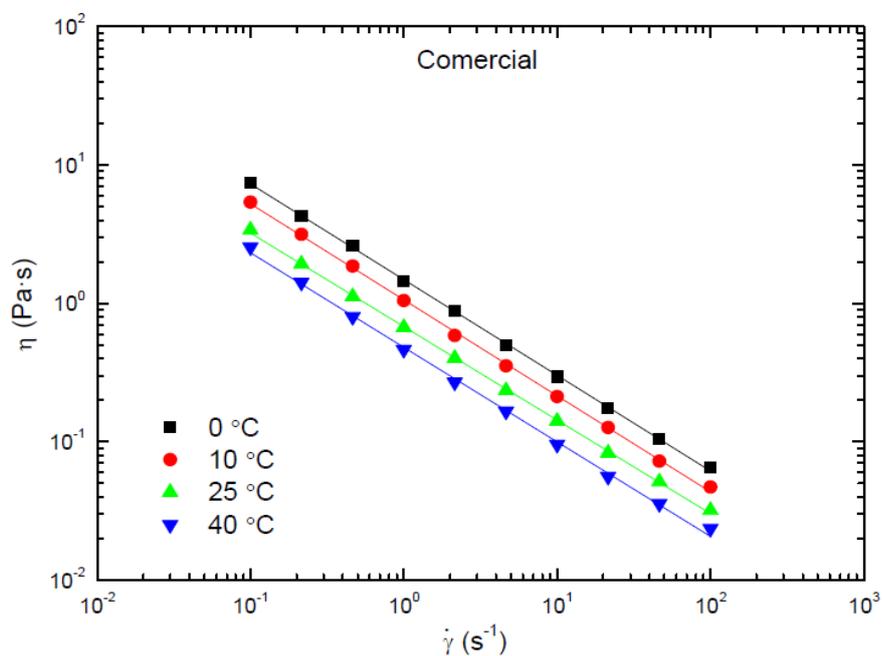


Figura 4.25 Curvas de flujo del batido comercial de leche de soja con borjón, a diferentes temperaturas.

Como se ha descrito en el capítulo 2, este modelo ha sido ampliamente utilizado para describir el comportamiento de flujo de diversos jugos, purés y derivados de frutas, como zumo de limón no clarificado [Sáenz y Costell, 1986], puré de ciruela y melocotón [Ibarz y Lozano, 1992], jugo clarificado y despectinizado de durazno [Ibarz *et al.*, 1991], de naranja [Ibarz *et al.*, 1993], jugo concentrado de mandarina a bajas temperaturas [Falguera *et al.*, 2010], pulpa de mango centrifugada [Vidal *et al.*, 2004] o pulpa de arazá [Hamniniuk *et al.*, 2005]. También se desvían del comportamiento newtoniano los zumos de frutas que contienen pectinas [Ibarz *et al.*, 1996], zumos concentrados de frutas [Rao *et al.*, 1977], jugo de endrina con bajo contenido de pulpa y pectina [Ibarz *et al.*, 1996], o jugo concentrado de naranja [Falguera e Ibarz, 2010].

Las propiedades reológicas de batidos de leche de soya con frutas no han sido estudiadas, por lo cual precisan ser establecidas. La literatura únicamente registra diversos trabajos sobre propiedades reológicas de bebidas lácteas con la adición de proteínas de soya [Guttierres y Barretto, 2009].

Los batidos estudiados están constituidos por una dispersión de partículas de pulpa de borjón en una solución acuosa de azúcares, ácidos orgánicos, sales y pectinas, por lo que según el criterio de clasificación seguido por Powrie y Tung (1976), se puede considerar al batido de leche de soya con borjón como una dispersión de la forma sólida/líquido y debido al apreciable tamaño de las partículas suspendidas como una suspensión.

El comportamiento reológico de tales sistemas alimentarios estará regido por las características de la fase sólida (forma, tamaño y concentración de las partículas) y por las de la fase líquida (naturaleza, forma, tamaño y concentración de las especies moleculares que la componen). Conforme aumenta el grado de concentración, las partículas

sólidas, en un principio, individuales, irían quedando cada vez más próximas unas de otras, lo que facilitaría la formación de grumos, que a su vez, se unirían para formar agregados, que también podrían asociarse llegando a formar una red o malla que atraparía la fase dispersante, provocando, de este modo, un fuerte incremento en los parámetros reológicos y alcanzar una determinada concentración crítica [Garza e Ibarz, 1998].

En la Tabla 4.10, se muestran los valores de los parámetros de la ley de la potencia, resultantes del ajuste. Un aumento de temperatura da lugar a una disminución del índice de consistencia, mientras que este parámetro aumenta claramente con la concentración de sólidos. Comportamientos semejantes han sido observados por otros autores en cremogenados de melocotón y sus concentrados [Ibarz *et al.*, 1991], en suspensiones de fibra dietética de naranja [Grigelmo-Miguel *et al.*, 1999], de melocotón [Grigelmo-Miguel *et al.*, 1999] y de manzana [Rao *et al.*, 2005].

En cuanto al índice de flujo, generalmente disminuye con la temperatura y aumenta con la concentración de sólidos solubles, a excepción del batido con 8 °Brix, que se caracteriza por índices de flujo relativamente altos. En general, los bajos valores del índice de flujo obtenidos confirman el carácter marcadamente pseudoplástico de los batidos de leche de soya con borjé estudiados.

Por otra parte, el batido comercial tomado como referencia, de 10° Brix, presenta valores de k y n similares a los del batido artesanal de 8° Brix, con valores del índice de flujo prácticamente constantes en el rango de temperaturas estudiado.

Tabla 4.10 Valores de las constantes de la Ley de la potencia para batidos de leche de soya con borojó a distintas concentraciones y temperaturas. Parámetros resultantes del ajuste al modelo potencial.

°Brix	T (°C)	k (Pa·sⁿ)	n
8	0	1,1	0,32
	10	0,78	0,32
	25	0,63	0,3
	40	0,53	0,29
12	0	2,95	0,31
	10	2,26	0,23
	25	2,09	0,17
	40	1,69	0,14
14	0	3,83	0,33
	10	3,02	0,27
	25	2,65	0,23
	40	2,51	0,21
16	0	4,46	0,36
	10	3,48	0,31
	25	3,2	0,3
	40	2,93	0,28
18	0	5,59	0,34
	10	4,49	0,33
	25	4,22	0,30
	40	3,78	0,28
Comercial	0	1,49	0,31
	10	1,06	0,31
	25	0,68	0,32
	40	0,48	0,32

4.3.2.1.1 Efecto de la concentración de sólidos solubles sobre los índices de consistencia y flujo en batidos de leche de soya con borjón

Como se ha comentado, al incrementar la concentración de sólidos solubles en los batidos aumenta el índice de consistencia, lo cual coincide con la mayoría de estudios previos realizados sobre suspensiones de frutas [Vitali y Rao, 1984; Schwartz *et al.*, 1989; Ibarz y Miguelsanz, 1989; Ibarz *et al.*, 1993, 2009]. Este efecto puede observarse claramente en la Figura 4.23, donde se muestra, además, que existe una variación potencial de este parámetro con la concentración de sólidos solubles ($R^2 > 0,977$):

$$k = k_o \cdot C^a \quad (\text{IV, 7})$$

donde, C es la concentración de sólidos solubles, expresados en °Brix, k_o es el índice de consistencia a 1 °Brix y “a” es una constante que indica la pendiente del descenso de k vs. C en escala logarítmica.

Esta ecuación potencial ha sido también aplicada para describir la influencia de la concentración de sólidos solubles sobre el índice de consistencia en pulpa de tuna [Matos-Chamorro *et al.*, 2010] y en purés y zumos de frutas [Rao *et al.*, 1981; Vitali y Rao, 1982].

En la Tabla 4.11 se presentan los parámetros de esta ecuación potencial, en función de la temperatura, resultantes de los ajustes mostrados en la Figura 4.26.

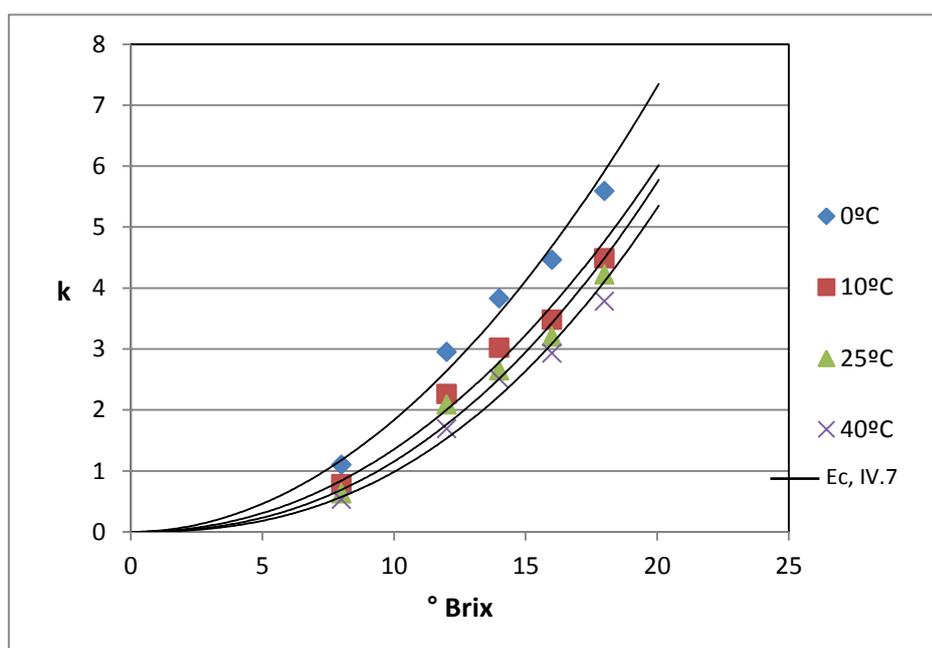


Figura 4.26 Efecto de la concentración sobre el índice de consistencia en batidos de leche de soja con borjón, a las diferentes temperaturas estudiadas.

Como se observa, k_0 , es decir el índice de consistencia para 1°Brix, disminuye con la temperatura, mientras que el parámetro “a” aumenta con la misma, indicando una mayor dependencia de la concentración de sólidos. Estos resultados coinciden con algunos estudios previos realizados en jugo concentrado de naranja [Falguera e Ibarz, 2010]

Tabla 4.11 Parámetros de ajuste del modelo potencial para el índice de consistencia de batidos de leche de soja con borjón, a temperaturas de 0 a 40 °C.

T (°C)	k_0 (Pa s ⁿ)	a
0	0,0187	1,99
10	0,0098	2,14
25	0,0057	2,31
40	0,0036	2,43

Por otra parte, el índice de flujo presenta una tendencia aproximadamente potencial a aumentar con la concentración de sólidos solubles, aunque los batidos de leche de soya con borrojó con 8°Brix no siguen esta tendencia, encontrándose valores más altos de lo esperado para este sistema, independientemente de la temperatura (Figura 4.27).

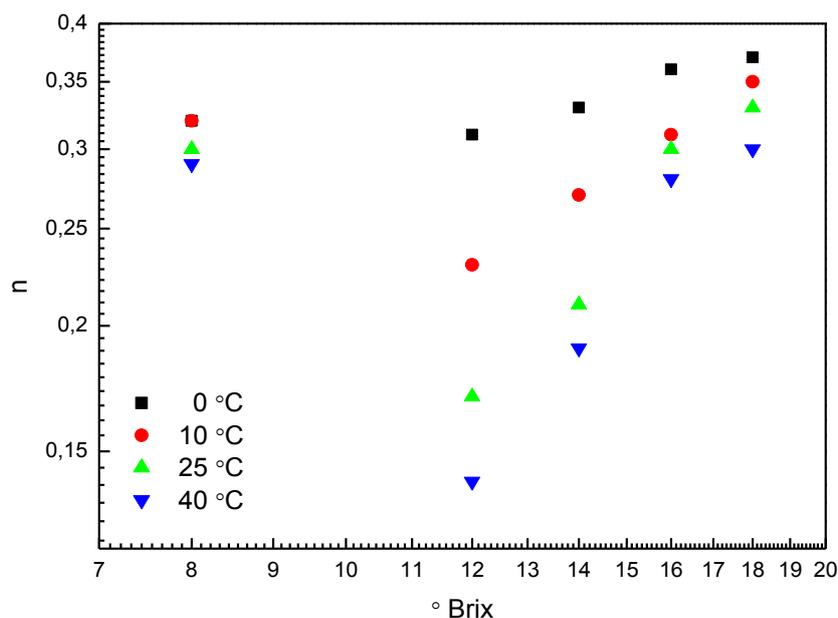


Figura 4.27 Efecto de la concentración sobre el índice de flujo en batidos de leche de soya con borrojó, a las diferentes temperaturas estudiadas.

4.3.2.1.2 Efecto de la temperatura sobre los índices de consistencia y flujo en batidos de soya con borrojó

Como es de esperar, el índice de consistencia de los batidos de soya con borrojó disminuye con la temperatura, como se observa en la Figura 4.28. En el rango de temperaturas estudiado este descenso viene descrito por una relación tipo Arrhenius ($R^2 > 0,934$):

$$k = A \cdot \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (\text{IV, 8})$$

donde, T es la temperatura en grados Kelvin, A el parámetro pre-exponencial, E_a la energía de activación para el flujo y R constante de los gases. La ecuación de Arrhenius ha sido ampliamente utilizada para representar la variación de la viscosidad o del índice de consistencia con la temperatura en sistemas dispersos alimentarios [Ibarz *et al.*, 2009].

Los valores de la energía de activación se recogen en la Tabla 4.12, los cuales disminuyen conforme aumenta la concentración de sólidos solubles de las muestras de batidos de leche de soya con borjón.

Por tanto, se encuentra una menor dependencia de la temperatura al aumentar la concentración de sólidos. Por otra parte, la influencia de la temperatura sobre el índice de consistencia, y sobre la viscosidad en general, es mucho menor para estos sistemas que para las mermeladas de borjón previamente analizadas (ver Tabla 4.6)

Contrariamente a lo descrito para otros sistemas alimentarios, donde el índice de flujo bien no se ve afectado por la temperatura [Alvarez *et al.*, 2006], o bien aumenta, en los batidos estudiados se ha encontrado un decrecimiento del índice de flujo con la temperatura, también observado previamente en el jugo concentrado de mandarina a bajas temperaturas [Falguera *et al.*, 2010] o en el puré de banano a temperaturas de 50 a 55 °C [Ditchfield *et al.*, 2004]. En todos los casos, este descenso puede describirse mediante una ecuación potencial ($R^2 > 0,935$) del tipo:

$$n = \beta \cdot T^b \quad (\text{IV, 9})$$

siendo, β y “ b ” dos parámetros ajustables. Los parámetros del modelo se presentan en la Tabla 4.13.

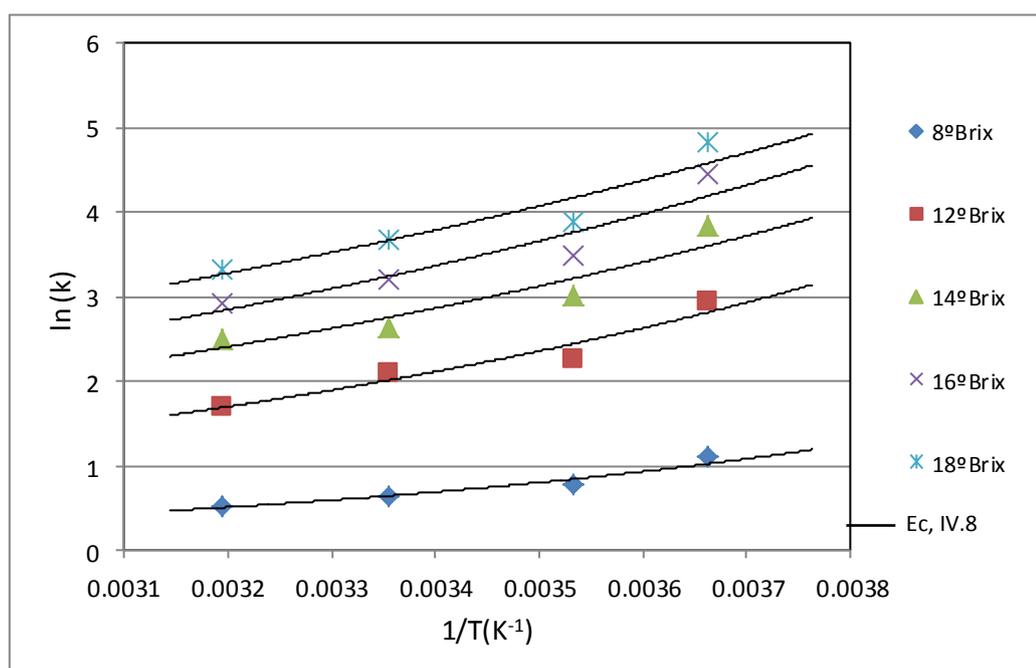


Figura 4.28 Efecto de la temperatura sobre el parámetro k de los batidos de leche de soja con borjón con diferentes concentraciones.

Tabla 4.12 Parámetros de ajuste de la ecuación de Arrhenius de los batidos de leche de soja con borjón con diferentes concentraciones de sólidos.

C (°Brix)	A	Ea (KJ/mol)
8	0,004	1,50
12	0,052	1,09
14	0,150	0,87
16	0,200	0,83
18	0,327	0,72

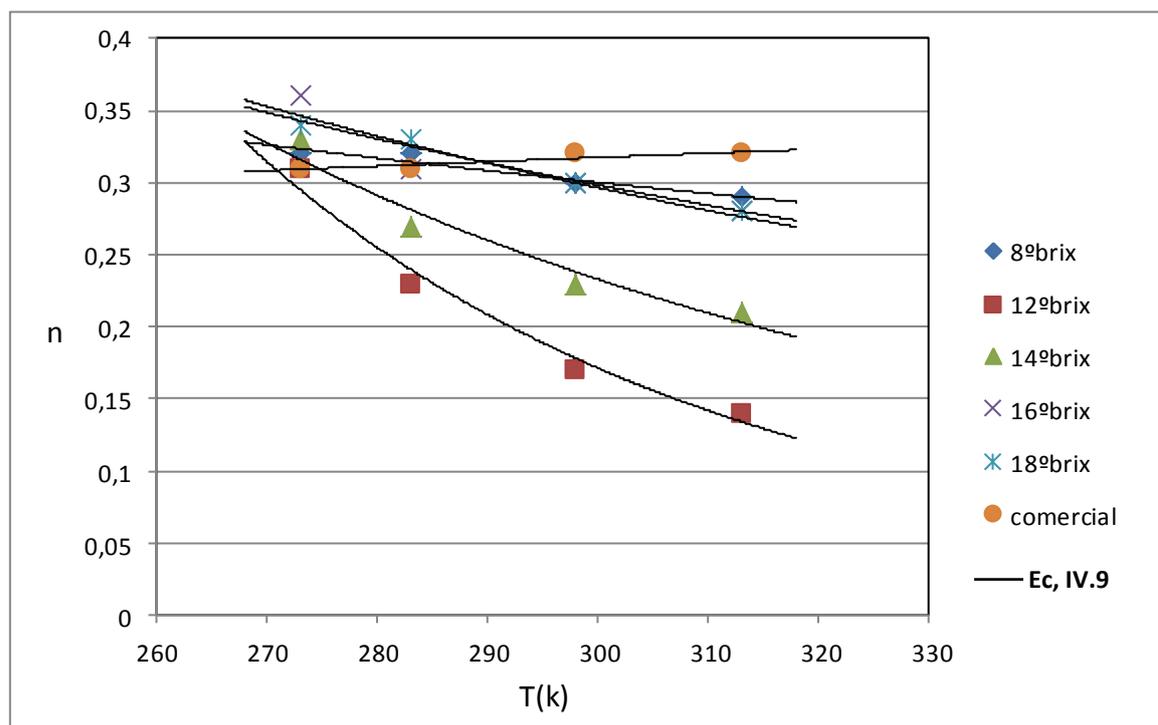


Figura 4.29 Efecto de la temperatura sobre el índice de flujo en batidos de leche de soja con borjón, a diferentes concentraciones.

Tabla 4.13 Parámetros de ajuste del modelo potencial (Ec. IV.9) para el índice de flujo de batidos de leche de soja con borjón, a diferentes concentraciones.

C (°Brix)	B	b
8	27,701	-0,793
12	3E + 13	-5,763
14	2E + 0,7	-3,234
16	3757,8	-1,656
18	1376,8	-1,488
Batido comercial	0,0647	0,279

El parámetro “b, toma valores negativos para los batidos artesanales. La menor dependencia térmica sobre ambos parámetros, k y n , la tiene el batido comercial tomado como referencia, aunque similar a la mostrada por el batido artesanal con 8°Brix.

4.3.3 Evaluación sensorial

Cada una de las diferentes formulaciones de batidos fue evaluada por el panel semientrenado de veinte catadores. Los resultados promedio por batido para cada una de las cinco variables sensoriales evaluadas y la comparación de medias (Tukey $p \geq 0,05$) de la evaluación sensorial de las cinco muestras se presentan en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14 Promedios de la evaluación sensorial de batidos de borjón

MUESTRA	OLOR	SABOR	CONSISTENCIA	DULZOR
0	2,54 ^a	2,73 ^{bc}	3,16 ^{ba}	3,41 ^{ba}
1	1,74 ^a	2,41 ^c	2,22 ^b	2,67 ^b
2	1,96 ^a	1,96 ^c	1,91 ^b	3,21 ^a
3	2,59 ^a	3,60 ^{ba}	2,91 ^{ba}	4,32 ^a
4	2,68 ^a	3,93 ^a	4,33 ^a	4,37 ^a
5	2,74 ^a	4,23 ^a	4,44 ^a	4,44 ^a
\bar{x}	2,38	3,14	3,16	3,74
CV	36,56	26,75	37,18	25,68

Letras diferentes en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas $p \leq 0,05$.

0: muestra comercial (testigo)
 1: batido artesanal a 8° Brix.
 2: batido artesanal a 12° Brix.
 3: batido artesanal a 14° Brix.
 4: batido artesanal a 16° Brix.
 5: batido artesanal a 18° Brix.
 \bar{x} : media
 CV: coeficiente de variación

Para el atributo sensorial olor, la prueba de Tukey mostró para un nivel de $p \geq 0,05$, incluida la muestra testigo, que no existieron diferencias

significativas entre las diferentes muestras evaluadas, aunque se observa una tendencia creciente de este atributo al aumentar la concentración de sólidos solubles. El coeficiente de variación fue de 36,56 %.(Tabla 4.14).

Para el atributo sabor, según la prueba de Tukey para un nivel de $p \geq 0,05$, se observó que existen diferencias significativas entre muestras. Las muestras que resultaron valoradas con índices superiores en este atributo sensorial fueron la 5, 4 y 3, con promedios de 4,23; 3,93 y 3,60, respectivamente, conforme al mayor contenido de pulpa ($^{\circ}$ Brix). La muestra que presentó el promedio más bajo en la escala sensorial fue la 2 con un promedio de 1,96, inferior a la muestra testigo.

Para el atributo consistencia, la prueba de Tukey al nivel de $p \geq 0,05$, mostró que también existieron diferencias significativas entre las diferentes muestras. En este caso, las muestras 5, 4 y el testigo (muestra comercial) fueron superiores, con promedios de 4,44; 4,33 y 3,16, respectivamente.

Finalmente, para el atributo dulzor, la prueba de Tukey indicó que no existieron diferencias significativas entre muestras aunque, de nuevo, resultaron mejor valorados los batidos con mayores valores en $^{\circ}$ Brix.

Los resultados obtenidos en el análisis sensorial, expresados como promedios de cada uno de los parámetros analizados se han representado mediante un gráfico de tela de araña, en el cual cada punto representa el valor medio de las respuestas dadas por los veinte catadores.

Como se observa en la Figura 4.30, sobre la base de los resultados obtenidos y el análisis de los mismos, puede deducirse que la formulación artesanal que más se asemeja al testigo (batido comercial), en cuanto a olor y consistencia es la muestra 3, que corresponde al batido de leche de soya con borjón de 14 $^{\circ}$ Brix, mientras que las muestras 1 y 2 son las que

más se asemejan al testigo en cuanto a los atributos sabor y dulzor, respectivamente.

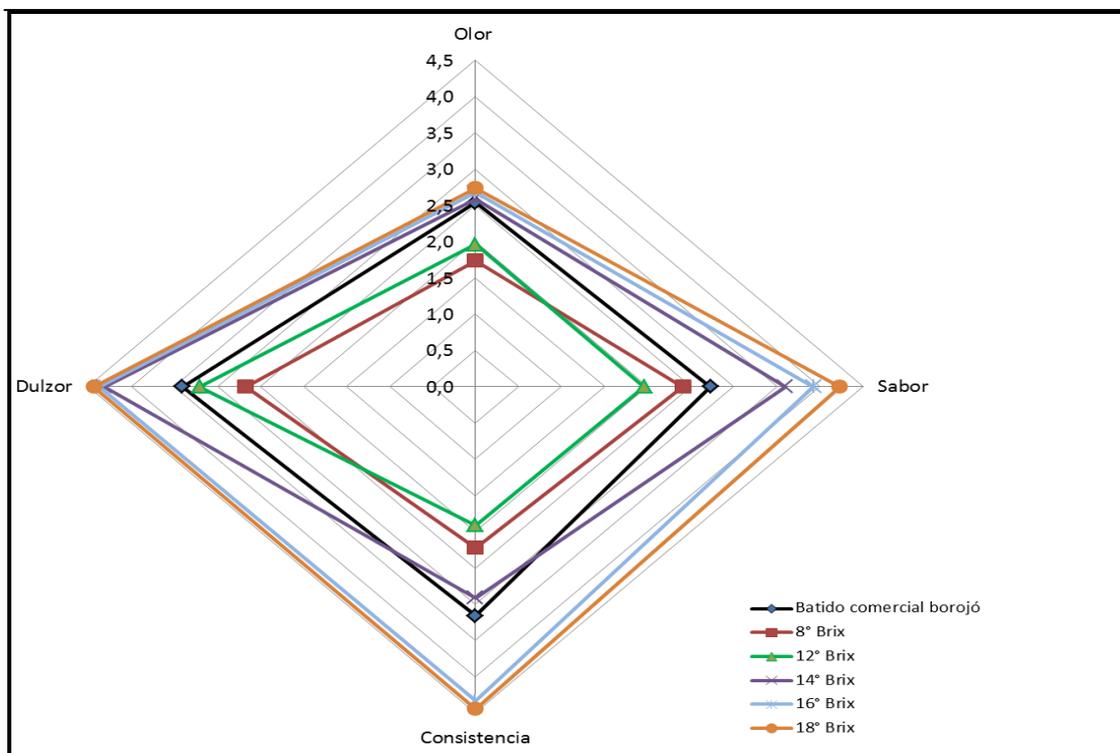


Figura 4.30 Valores medios de la valoración sensorial para cada una de las muestras de batidos de leche de soja con borojó, en cada atributo evaluado.

La muestra 3 también se asemejó estadísticamente al testigo en el atributo olor (Tabla 4.14). Por lo tanto, sobre la base de la mayor cantidad de características sensoriales similares a tomar en cuenta, la muestra 3 (14 °Brix) es la que más se asemeja globalmente al testigo; por lo cual se realizó una prueba discriminativa de tipo triangular.

Así, las muestras las evaluó un panel integrado por veinte panelistas semientrenados, familiarizados con la prueba triangular. El total de juicios fue de 20 y las respuestas correctas fueron 13, lo que indica que no hay diferencias significativas entre ambas muestras de batidos, con un nivel de

significancia del 1% y 99% de confianza, de acuerdo con la tabla de niveles de significancia de la prueba triangular [Anzaldúa, 1994].

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

- ✓ El rendimiento de la pulpa de borojó (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) obtenida fue del 82.3%. La caracterización bromatológica y fisicoquímica de la pulpa fresca de borojó, permite catalogarla como ácida, con un buen nivel de calcio y constituye una fuente energética de importancia debido al alto contenido de carbohidratos.
- ✓ Los recuentos de microorganismos permiten concluir que la pulpa fresca obtenida es de óptima calidad microbiológica. El pH de 2,93 y la protección que brinda la corteza de la fruta, es un elemento o factor intrínseco que restringe el crecimiento de las poblaciones de microorganismos.
- ✓ La pulpa de borojó (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) se comporta como un fluido no newtoniano pseudoplástico, donde la viscosidad disminuye con la velocidad de deformación y presenta un comportamiento viscoelástico tipo gel, donde predomina su parte elástica. La temperatura no influye significativamente en los comportamientos viscoelástico y viscoso.
- ✓ La caracterización viscoelástica de las mermeladas artesanales de borojó revela un comportamiento típico de gel, mientras que el flujo viscoso puede ser descrito por el modelo de Herschel-Bulkley, presentando un esfuerzo umbral característico.
- ✓ En general, las funciones viscoelásticas lineales y los valores de viscosidad de las mermeladas artesanales de borojó se incrementaron con la concentración de pectina y disminuyeron al aumentar la temperatura. La influencia de la temperatura sobre el módulo de almacenamiento (G'), esfuerzo umbral (τ_0) y el índice de consistencia k puede caracterizarse mediante una relación de tipo Arrhenius.

- ✓ Las formulaciones de mermeladas artesanales que contienen bajas concentraciones de pectina (0,25 y 0,5 % en peso) son reológicamente similares a las muestras comerciales, tanto de borjón como de melocotón, que fueron utilizadas como referencias. Los valores de esfuerzo umbral para ambas formulaciones de mermeladas comerciales están generalmente comprendidos entre los valores obtenidos para las mermeladas artesanales de borjón que contienen 0,25 y 0,5 % de pectina añadida. Sin embargo, la mermelada de melocotón comercial exhibió una dependencia mucho menor de las funciones viscoelásticas con la frecuencia, que las mermeladas artesanales de borjón.
- ✓ Las formulaciones de mermeladas artesanales de borjón exhiben una mayor dependencia de las funciones viscoelásticas lineales de la temperatura, que la muestra de mermelada comercial de melocotón, pero inferior a la mermelada comercial de borjón. Por el contrario, la influencia de la temperatura sobre el esfuerzo umbral es menor para ambas mermeladas comerciales, mientras que el efecto de la temperatura en el índice de consistencia es muy similar para todas las muestras de mermeladas estudiadas.
- ✓ La evaluación sensorial de las mermeladas artesanales de borjón, mostró que la mermelada elaborada con la adición de 1% de pectina, es la que posee mayor cantidad de atributos similares a la mermelada comercial. No se detectaron diferencias significativas en los atributos de la mermelada artesanal de borjón elaborada con la adición del 1% de pectina y la mermelada comercial.
- ✓ Los diferentes batidos artesanales formulados con leche de soya y pulpa de borjón y el batido comercial tomado como referencia, muestran un comportamiento de flujo pseudoplástico, con una caída

potencial de la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla que se describe satisfactoriamente mediante la ley de la potencia.

- ✓ Un aumento de la temperatura da lugar a una disminución del índice de consistencia de los batidos de borjón, mientras que este parámetro aumenta claramente con la concentración de sólidos. El efecto de la concentración de sólidos solubles sobre el índice de consistencia puede describirse adecuadamente mediante una ecuación potencial, mientras que el efecto de la temperatura se describe mediante la ecuación de Arrhenius. Los valores de la energía de activación disminuyen conforme aumenta la concentración de sólidos solubles.
- ✓ El índice de flujo de los batidos de borjón, por lo general, disminuye con la temperatura y aumenta con la concentración de sólidos solubles de forma potencial, a excepción del batido con 8° Brix, que se caracteriza por índices de flujo relativamente altos.
- ✓ El batido comercial tomado como referencia, de 10° Brix, presenta valores de k y n similares a los del batido artesanal de 8° Brix, con valores del índice de flujo prácticamente constantes en el rango de temperaturas estudiado.
- ✓ La evaluación sensorial de los batidos artesanales formulados con leche de soya y pulpa de borjón refleja que la muestra con 14° Brix es la que, en el conjunto de atributos sensoriales, más se asemeja al batido comercial, no detectándose diferencias significativas entre ambas formulaciones en una prueba triangular.

CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFÍA

Ahmed, J.; Ramaswamy, H.S. (2004). Response surface methodology in rheological characterization of papaya puree. *International Journal of Food Properties*. 7 (1):45-58.

Agoub, A. A.; Giannouli, P.; Morris, E.R. (2009). Gelation of high methoxy pectin by acidification with D-glucono-d-lactone (GDL) at room temperature. *Carbohydrate Polymers*, 75:269–281.

Almdal, K.; Dyre, J.; Hvidt, S.; Kramer, O. (1993). Towards a phenomenological definition of the term “gel”, *Polymer Gels Networks*, 1: 5-17.

Alvarez E.; Cancela, M. A.; Maceiras, R. (2006). Effect of temperature on rheological properties of different jams. *International Journal of Food Properties*, 9:135-146.

Andrade R. D.; Torres R.,Montes E.J.; Ortega F.A. (2007). Comportamiento reológico de pulpas de frutas tropicales: guayaba (*Psidium guajava* L), guanábana (*Annona muricata* L), zapote (*Calocarpum sapota* Merr), níspero (*Achras sapota* L). *Universidad de Pamplona. Colombia*, 5:37-43.

Anzaldúa-Morales, A. (1994). La evaluación sensorial de los alimentos en la teoría y la práctica. Zaragoza: Acribia, 198 p.

AOAC. Association of Official Analytical Chemist. (2000). *Official Methods of Analysis* (17 th.Ed). Gaithersburg, MD, USA.

Arango, A.; T. Quijano. (1986). Estudio de los frutos de Borojoa Patinoi C. *Revista Latin Química*, 17(3):167-169.

Astarita,G.(1990). The engineering reality of yield stress. *Journal Rheology*, 34:275-277.

Badui, S. (1996). *Química de los Alimentos*. Longman/Alhambra Mexicana. México. 645 p.

Baker, R.A.; Berry, N.; Hui, Y.H.; Barrett, D.M. (2005). *Food preserves and jams. Processing Fruits*, 2nd ed.; Barrett, D.M., Somogyi, L., Ramaswamy, H.S. Eds.; CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Barbosa-Cánovas, G. V.; Ibarz.; A y Peleg.; M. (1993). *Propiedades reológicas de alimentos fluidos*. *Revisión Alimentaria*, 242:39-89.

Barnes, H.A.; Walters, K. (1985) *The yield stress myth*, *Rheologica Acta*, 24:323-326.

Basu, S.; Shivhare U.S.; Raghavan, G.S.V. (2007). *Time dependent rheological characteristics of pineapple jam*. *International Journal of Food Engineering*, 3: 1-10.

Basu, S.; Shivhare, U.S. (2010). *Rheological, textural, microstructural and sensory properties of mango jam*. *Journal of Food Engineering*, 100:357-365.

Basu, S.; Shivhare U.S.; Singh T.V.; Beniwal V.S. (2011) *Rheological, textural and spectral characteristics of sorbitol substituted mango jam*. *Journal of Food Engineering*, 105:503-512.

Baumgaertel, M.; De Rosa, M.E.; Machado, J.; Masse, M.; Winter, H.H. (1992). *The relaxation time spectrum of nearly monodisperse polybutadiene melts*. *Rheologica Acta*, 31: 75-82.

Belitz, H.-D.; y Grosch, W. (1997). *Química de Alimentos*. 2da E4d. Editorial Acribia, S.A.

Bhattacharya, S. (1999). *Yield stress and time-dependent rheological properties of mango pulp*. *Journal of Food Science*, 64(6): 1029-1033.

Bhandari, P. N.; Singhal, R. S.; Kale, D. D. (2002). Effect of succinylation on the rheological profile of starch pastes. *Carbohydrate Polymers*, 47:365–371.

Bondi, A. (1956). Theories of viscosity. En *Rheology*, Vol. I. Ed. Eirich, F. R. Academic Press. New York. U.S.A.

Borwankar, R. P.; Frye, L. A.; Blayrock, A. E.; Sasevich, F. J. (1992). Rheological characterization of melting of margerines and tablespreads. *Journal of Food Engineering*, 16: 55-74.

Bourne, M.C. (1992). Firmer texture of processed apple products. Special report New York State Agricultural Experiment Station Geneva, 65: 5-6.

Branco, I.; Gasparetto, C. (2003). Response surface methodology applied to the study of temperatura effect on the rheological behavior of ternaries mixtures with mango pulp and orange and carrot juices. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 23:166-171.

Carbonell, E.; Costell E., Durán L. (1991). Caracterización del flujo de mermeladas comerciales españolas. *Revista Agroquímica y Tecnología Alimentaria*, 31:227-235.

Cavalcante, R.V.(1991). *Frutas comestíveis da Amazônia*. (5 Ed.). CEJUP, Museo Paraense E. Goeldi, Belém. 273 p.

Chan-Blanco, Y.; F. Vaillant, A. Pérez, M.; Reynesc, J.; Brillouet.; P. Brat. (2006). The noni fruit (*Morinda citrifolia* L.): A review of agricultural research, nutritional and therapeutic properties. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(6): 645–654.

Clark, A.H.; Rss-Murphy, S.B. (1987). Structural and mechanical properties of biopolymer gels, *Advances in Polymer Science*, 83: 57-192.

CORPEI, (2005). Naranjilla, pitahaya, arazá y borojó con agroquímicos. 20 p.

Costell, E.; Durán, L. (1982). Reología físico-química de los zumos y purés de frutas. *Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos*, 22(1): 81-94.

Cuvelier, G.; Tonon, C.; Launay, B. (1987). Xanthan-carob mixtures at low concentration: viscometric study. *Food Hydrocolloids*, 1(5/6): 583-585.

Da Silva F.; D. Guimaraes.; C. Gasparetto. (2005). Rheology of acerola juice: effects of concentration and temperature. *Ciência e Tecnologia de Alimentos* 25(1):121-126.

Dak, M.; Verma R.C.; Sharma G.P. (2006). Flow characteristics of juice of "Totapuri" mangoes. *Journal of Food Engineering*, 76(4): 557-561.

Dak, M.; Verma, R.C.; Jaaffrey S.N.A. (2007). Effect of temperatura and concentration on rheological properties of "Kesar" mango juice. *Journal of Food Engineering*, 80(4):1011-1015.

Darby, R. (1976). *Viscoelastic fluids: An Introduction to Their Properties and Behavior*. Marcel Dekker (ed), New York.

Dealy, J.M. (1982). *Rheometer for molten plastics*, Van Nostrand(ed), New York.

DECAB-EPN. (2007). *Métodos analíticos*. Escuela Politécnica Nacional. Quito, 1-9 p.

Ditchfield, C.; C.C. Tadini; R. Singh; R.T. Toledo. (2004). Rheological Properties of Banana Puree at High Temperatures. *International Journal of Food Properties*, 7:571-584.

Edwards, S.F.; Lillford, P.J.; Blanshard, J.M.V. (1987). Gel an networks in practice and theory, Food Structure and Behaviour, Blanshard, J.M.; Lillford, P.J. (eds.), Academic Press, Londres. 1.

Elgar, H.J.; Watkins, C.B.; Murray, S.H.F; Gunson, A. (1997). Quality of 'Buerre Bose' and 'Doyenne du Cornice' pears in relation to harvest date and storage period. Postharvest Biology and Technology, 10: 29-37.

Elliott, J.M.; Ganz, A.J. (1977). Salad dressings-primary rheological characterization. Journal of Texture Studies, 13:43-58.

FDA/CFSAN/BAM FDA (Food and Drug Administration / Center for Food Safety and Applied Nutrition / Bacteriological Analytical Manual) (2001) Washington, USA. Chapter 3 Conventional Plate Count, 1-7p.

FDA/CFSAN/BAM FDA (Food and Drug Administration / Center for Food Safety and Applied Nutrition / Bacteriological Analytical Manual). (2002). Washington, USA. Chapter 4. Enumeration of Escherichia Coli and the Coliform Bacteria. 1-14 p.

Falguera, V.; Ibarz, A. (2010). A new model to describe flow behavior of concentrated orange juice. Food Biophysics, 5:114-119

Ferreira G.; Melo A. J.; Silvestre R.; Gasperetto C. A. (2002). Efeito da temperatura no comportamento reológico das polpas de caju e goiaba. Revista Ciencias Exatas e Naturais, 4(2): 175-184.

Ferry, J.D. (1980). Viscoelastic properties of Polymers, J. Wiley & Sons (ed), Nueva York.

Figoni, P.I.; Shoemaker, C.F. (1983). Characterization of time dependent flow properties on mayonnaise under steady shear. Journal of Texture Studies, 14: 431-442.

Fillion, L.; Kilcast D. (2002). "Consumer perception of crispness and crunchiness in fruits and vegetables". *Food Quality and Preference*, 13(1): 23-29.

Fiszman, S.M.; Costell, E.; Duran, L. (1984). Medida del comportamiento reológico de geles de pectina de alto metoxilo con un reómetro de conoplaca. Relación con la composición. *Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos*, 2:191-198.

Forster, E.O.; Kolfenbach, J.J. (1958). Viscoelastic behaviour of greases. *Lubrication Conference*, Los Angeles.

Gabriele, D.; De Cindio, B.; D'Antona, P. (2001). A weak gel model for foods. *Rheologica Acta*, 40:120-127.

Gallegos, C.; Franco, J.M. (1999). Rheology of food, cosmetics and pharmaceuticals. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 288-293.

Gallegos, C.; Franco, J.M.; Madiedo, J.M.; Raymundo, A.; Sousa I. (2002). Non-linear viscoelasticity modeling of vegetable protein-stabilized emulsions. *Engineering and Food for the 21st Century*. CRC Press. J. Welti-Chanes, G.V. Barbosa-Cánovas y J.M. Aguilera (eds.), 415-430.

Gallegos, C.; Berjano, M.; Garcia F. P.; Muñoz, J.; Flores V. (1988). "Aplicación de un modelo cinético al estudio del flujo transitorio en mayonesas". *Grasas y Aceites*, 39:254-263.

Garza, S.; Ibarz, A. 1998. Comportamiento reológico de cremogenado de melocotón. *Brazilian Journal of Food Technology* 1 (12): 12-24.

Gekas, V. (1992). *Transport phenomena of foods and biological materials*. CRC Press. Boca Ratón, Florida. U.S.A.

Gentry, A. (1988). Changes in plant community diversity and floristic composition on environmental and geographical gradients. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 75:1-34.

Giboreau, A.; Dacremont C.; Egoroff C.; Guerrand S.; Urdapilleta I.; Candel D.; Dubois D. (2007). "Defining sensory descriptors: Towards writing guidelines based on terminology". *Food Quality and Preference*, 18:265-274.

González, M^a.M.; Navarro, T.; Gómez, G.; Pérez R.A.; De Lorenzo, C. (2007). Análisis sensorial de aceituna de mesa: I. Configuración de un grupo de cata y obtención de escalas normalizadas. *Grasas y Aceites*. 58(3): 225-230.

Glicksman, M.; Farkas, E.H. (1966). Hydrocolloids in artificially sweetened foods. *Food Technology*, 20(2): 58-61.

Gómez-Díaz, D.; Navaza, J. M.; Quintáns-Riveiro, L. C. (2004). Estudio viscosimétrico preliminar de mieles de bosque denominación específica "miel de Galicia". *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 4(4):234-239.

Gorbatov, A. V.; Gorbatov, V. M. (1974). Advances in sausage meat rheology. *Journal Texture Studies*, 4: 406-437.

Groves, M.J.; Ahmad A.B. (1976). Some rheological properties of lyotropic liquid crystals formed by phosphate polyoxyethylene surfactants, n-hexane and water, *Rheological Acta*, 15, 501-507.

Guerrero, S. N.; Alzamora, S. M. (1997). Effect of pH, Temperature and Glucose Addition on Flow Behavior of Fruit Purees I. Banana Puree. *Journal of Food Engineering*, 33:239-256.

Guerrero, S. N.; S. M. Alzamora. (1998). Effect of pH, Temperature and Glucose Addition on Flow Behaviour of Fruit Purees: II. Peach, Papaya and Mango Purées. *Journal of Food Engineering*, 37:77-101.

Gutierrez, R.; Barreto, A. (2009). Rheological and sensory characteristics of functional dairy beverages. *Ciencias Agrarias*, 30(3):629-646.

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

Haghighi, M.; Rezaei, K.; Labbafi, M.; Khodaiyan, F. (2010). On the formulation design and rheological evaluations of pectin-based functional gels. *Journal Food Science*, 76, E15-E22.

Haminiuk, C.; M. Sierakowski, D.; Izidoro.; M. Masson. (2006). Rheological Characterization of Blackberry Pulp. *Brazilian Journal of Food Technology*, 9(4): 291-296.

Harnanan, S. W. (2001). Effect of processing, preservation and storage on rheology of guava pulp. *Journal of Texture Studies*, 32:271-284.

Harper, J.; Lebermann, K.W. (1962). Rheological behaviour of pear purees, *Proceedings of the First International. Congress of Food Science and Technology*, (1):719-728.

Harper, J. C.; El-Sahrigi, A. F. (1965). Viscosimetric behaviour of tomato concentrates. *Journal Food Science*. 30:470-476.

Hermida, J. R. (2000). *Fundamentos de Ingeniería de Procesos Agroalimentarios*. Ed. Tecnología de alimentos. 256 p.

Hernández, M.; Barrera, J., Carrillo M.; Bardales, X.; Martínez, O.; Fernández, J. (2007). Manejo, uso y aprovechamiento de frutales nativos

de la amazonía colombiana. V Congreso Iberoamericano de Tecnología Postcosecha y Agroexportación. Cartagena (Murcia) España.

Herschel, W.H.; Bulkeley, R. (1926). Konsistenzmessungen von gumibenzollosungen, *Kolloid-Z*, 39:291-300.

Higgs, S. J.; Norrington, R. J. (1971). Rheological properties of selected foodstuffs. *Process Biochemistry*, 615:52-54.

Holdsworth, S. D. (1993). Rheological Models used for the Prediction of the Flow Properties of Food Products: a Literature Review. *Trans I ChemE*, v. 71, Part C, 139-179 p.

Hollihan, M. (2004). Estudio de mercado para el Borojó. CORPEI. Quito, Ecuador. 27 p.

Ibarz, A. (1993). Reología de productos alimentarios. *Theknos*. 136:46-62

Ibarz, A.; Casero, T. (1987). Reología de zumos de manzana de diferente variedad. *Alimentaria*, 185:57-59.

Ibarz, A.; Pagan, J. (1987). Rheology of raspberry juices. *Journal Food Engineering*, 6:269-289.

Ibarz, A.; Miguelsanz, R. (1989) Variation with temperatura and soluble solids concentration of the density of a depectinised and clarified pear juice. *Journal Food Engineering* 10:319-323.

Ibarz, A.; Pagán, J.; Gutierrez, J.; Vicente, M. (1989). Rheological properties of clarified pear juice concentrates. *Journal of Food Engineering*, 10: 57-63.

Ibarz, A.; Pagan, J; Miguelsanz, R. (1991). Rheology of clarified fruit juices I: Peach juices. *Journal Food Engineering*, 12:63-73.

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

Ibarz, A.; Ortiz, M. J. (1993). Reología de zumos de melocotón: influencia del contenido en pulpa. *Alimentación, equipos y tecnología*. 12(8): 81-86 p.

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

Ibarz, A.; Garvín, A.; Costa, J. (1996). Rheological behaviour of sloe (*Prunus spinosa*) juices. *Journal Food Engineering*. 27:423-430.

Ibarz, A.; Gonçalves, C. A.; Esplugas, S. (1996). Rheology of clarified passion fruit juices. *Fruit Processing*, 6:330-333.

Ibarz, A y Barbosa, V. (2005). *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. Editorial Tecnología de Alimentos.

Ibarz, R.; Falguera, V.; Garvín, A.; Garza, S.; Pagán, J.; Ibarz, A. (2009). Flow behaviour of clarified orange juice at low temperatures. *Journal of Texture Studies*. 40: 445-456.

INEN. Norma Técnica Ecuatoriana 419. (1988). *Conservas vegetales. Mermelada de frutas*. Requisitos. Quito, Ecuador.

INEN. Norma Técnica Ecuatoriana 2337. (2008). *Jugos, pulpas, concentrados, néctares, bebidas de frutas y vegetales*. Requisitos. Quito, Ecuador.

UNE- ISO 4120. (2008). *Análisis sensorial. Metodología. Prueba triangular*

Jadhav, V. S.; Awaz, H. B.; Patil, G. R.; Thombre, B. M. (2003). Studies on preparation of sapota milk shake. *Journal Maharashtra Agricultural Universities*, 27(3):306-308.

Jaramillo, L.; M. Arguello, A.; Benítez.; M.J. Borja. (2005). Ficha Técnica Biocomercio Sostenible en el Ecuador, 16 p.

Jay, J. M. (1992). *Modern Food Microbiology*. (5th Ed.). Chapman & Hall, 176 p.

Jiménez, L.; Ferrer, J. L.; Garcia, I. (1987). Modelos reológicos para líquidos alimentarios. *Alimentación, equipos y tecnología*, (2):295-299.

Khalil, K. E.; Ramakrishna, P.; Nanjundaswamy, A. M.; Patwardhan, M. V. (1989). Rheological behaviour of clarified banana juice: effect of temperatura and concentration. *Journal Food Engineering*. 10:231-240.

Kokini, J. L. (1992). Rheological properties of foods, in *Handbook of Food Engineering*. Heldman, D. R., Lund, D. B. Eds. Marcel Dekker. New York. 1-38 p.

Kuş, S.; Altan, A.; Kaya, A. (2005). Rheological behavior and time-dependent characterization of ice cream mix with different salep content. *Journal of Texture Studies*, 36: 273-288.

Kyereme, M.; Hale, S.; Farkas, B.E. (1999). Modeling the temperature effect on the flow behavior of sweet potato puree. *Journal of Food Process Engineering*, 22: 235-247.

Lal, G.; Siddappaa, G.S.; Tandon, G.L. (1998). *Preservation of fruits and vegetables*, ICAR, New Delhi, 197 p.

Lapasin, R.; Prici, S. (1995). *Rheology of Industrial polysaccharides. Theory and applications*. Blackie Academic and Professional, Glasgow. 250-494.

Lodge, N.; Nguyen, T.; McIntyre, D. (1987). Characterization of a crude kiwifruit pectin extract. *Journal of Food Science*, 52(4): 1095-1096.

Macosko, C.W. (1994). Rheology, principles, measurements and applications, VCH Publishers Inc. (ed), New York.

Magaña-Barajas, E.; Ramírez Wong, B.; Platt-Lucero, L.C.; López Ahumada, G.A.; P. I. Torres,P.I.; D. I. Sánchez-Machado,D.I. (2009). Caracterización viscoelástica de masas de variedades de trigos suaves. Revista Tecnología, Ciencia y Educación, 24(1):12-22.

Maguerramov M.A.; Abdulagatov, A.I.; Azizov, N. D.; Abdulagatov, I.M. (2007). Effect of temperature, concentration, and pressure on the viscosity of pomegranate and pear juice concentrates. Journal of Food Engineering, 80(2):476-489.

Mann, E. J. (1995). New products. Dairy Industries International, 60(4):19.

Martinez, G.; Espinosa, B.; Banguela, S.; Chang, L. (1998). Powdered mixtures for milk shakes and ice cream. Alimentaria, 35(291):89-90.

Medina, M.; F. Pagano. (2003). Caracterización de la pulpa de guayaba (*Psidiumguajava* L.) tipo “Criolla Roja”. Revista Facultad de Agronomía (LUZ), 20:72-86.

Medina, M.; Sepúlveda, N. (2006). Micropropagación del borojó vía embriogénesis somática, método para la selección clonal para el sexo, Revista Institucional de la Universidad Tecnológica del Chocó “Investigación, biodiversidad y desarrollo”, Chocó, Colombia, 31-35 p.

Mehinagic, E.; Royera, G.E.; Bertrand, D.; Symoneaux, R.; Laurens, F.; Jourjon, F. (2003). Relationship between sensory analysis, penetrometry and visible NIR spectroscopy of apples belonging to different cultivars. Food Quality and Preference, 14:473-484.

Meilgaard, M.; Civille, G. V.; Carr, B. T. (1999). Sensory Evaluation Techniques. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, 257-267 p.

Mejía, M. (1984). Borojón. Fruta ecuatorial colombiana. Colombia Amazónica, 1(2):89-106.

Mizrahi, S.; Berk, Z. (1972). Flow behaviour of concentrated orange juice: mathematical treatment. Journal of Texture Studies, 3(1): 69-79.

Moran, D.P.J. (1994). Fats in spreadable products. Fats in Food products Professional, Blackie Academic & Professional, Londres.

Morris, E. R.; A. Cutler, N.; Ross-Murph.; S. B. Rees.; J. Price. (1981). Concentration and shear-rate dependence of viscosity in random coil polysaccharide solutions. Carbohydrate Polymers, 1:5-21.

Mosquera, J.; Arenas, E. (1995). El borojón. Cultivo agroforestal del Chocó, fundamentos para el desarrollo sostenible. Codechocó.

Mosquera, L. H.; G. Moraga.; N. Martínez-Navarrete. (2010). Effect of maltodextrin on the stability of freeze-dried borojón (*Borojoa patinoi* C.) powder. Journal Food Engineering, 97(1):72-78.

Mosquera, M. L. H.; Ríos, H. A.; Zapata, P. S. (2005). Obtención de una materia prima con valor agregado mediante secado por aspersion a partir del fruto fresco de borojón (*Borojoa patinoi* Cuatr.). En: Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó, 11:(23), 5-10.

Mota, A.; Ibarz. A. (2006). Comportamiento viscoelástico de pulpa de membrillo en función de la concentración de sólidos solubles. Revista Ciencia y Tecnología de los Alimentos, 26(1):217-219.

Muller, H.G. (1973). An introduction to food rheology. Heinemann. London. Cap. 6. p. 57-74.

Muteki, K.; MacGregor, J. F.; Ueda, T. (2007). Mixture designs and models for the simultaneous selection of ingredients and their ratios. *Chemometrics Intelligent Laboratory Systems*, 86(1): 17-25.

Nielsen S. (1998). *Food Analysis* (2nd edition); Aspen Publication, Gaithersburg, Maryland.

Nindo, C.; J. Tang, J. Powers.; P. Taknar. (2007). Rheological properties of blueberry puree for processing applications. *LWT- Food Science and Technology*, 40 (2):292-299.

Odigboh, E. V.; Mohsenen, N. N. (1975). Effects of concentration on the flow rheology of butter and margarine. *Journal Texture Studies*, 6:533-539.

Pelegrine, D.H.; F. Silva.; C. Gasperrato. (2002). Rheological behavior of mango and pineapple pulps, *LWT- Food Science and Technology*, 35(1):645-648.

Perry, R. H.; Chilton, C. H. (1982). *Manual del Ingeniero Químico*. 2ª Edición. McGraw Hill. México.

Quemada, D.; Flaud, P. and Jezquel, P.H. (1984) *Congress on Rheology*, Mexico, 3, 481.

Ranganna,S. (1977). *Manual of Analysis of Fruit and Vegetable Products*. McGraw Hill Publishing Company, 634 p.

Rao, M. A.; Bourne, M. C.; Cooley, H. J. (1981). Flow properties of tomato concentrates. *Journal of Texture Studies*, 12:521-528.

Rao M.A.; Tattiyakul J. (1999) Granule size and rheological behavior of heated tapioca starch dispersions. *Carbohydrate Polymers*, 38:123-132.

Rao, M. A.; Cooley, H.J.; Vitali, A.A. (1984). Flow properties of concentrated juices at low temperatures. *Food Technology*, 38:113-119.

Rao, M.A. (1977). Rheology of liquid foods. *Journal of Texture Studies*, 8(2): 135–168.

Razavi, S.; H.Karazhiyan. (2012). Rheological and textural characteristics of date paste. *International Journal of Food Properties*, 15:281–291.

Reiner, M. (1960). Deformation, strain and flow, Lewis (ed), London.

Resch, J.J. (2002). Rheological and physicochemical properties of derivatized whey protein concentrate powders. *International Journal of Food Properties*, 5 (2): 419–434.

Rha C. K. (1978). Rheology of fluid foods. *Food Technology*, July, 77-82.

Sáenz, C.; Costell, E. (1986). Comportamiento reológico de productos de limón. Influencia de la temperatura y de la concentración. *Revista Agroquímica y Tecnología Alimentaria*, 26:581-588.

Sahmer, K.; Qannari, E.M. (2008). Procedures for the selection of a subset of attributes in sensory profiling. *Food Quality and Preference*. 19(2): 141-145.

Salamanca, G.; M. P. Osorio.; L. M. Montoya. (2010). Elaboración de una bebida funcional de alto valor biológico a base de borjón (*Borojoa patinoi*). *Revista Chilena de Nutrición*, 37(1):89.

Sánchez C.; Oria, R.; Sánchez-Gimeno; A.C. (2006). Efecto de la temperatura en las propiedades reológicas de purés de guayaba (*Psidium Guajaba L.*). Simposio Poscosecha 2006. Orihuela, Valencia, España.

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

Saravacos, G. D. (1995). Transport properties in processing of fruit and vegetables. *Food Technology*, 49:99-105.

Schawartz, M.; Costell, E. (1989). Influencia de la temperatura y de la concentración en la viscosidad de los zumos de manzana y de uva. *Revista Agroquímica de Tecnología Alimentaria*, 2:239-245.

Schramn, G. (1994). *A Practical Approach to Rheology and Rheometry*, Gebrueder Haake GmbH (ed), Germany.

Shama, F.; Sherman, P. (1973). Identification of stimuli controlling the sensory evaluation of viscosity. II. Oral methods. *Journal of Texture Studies*, 4:111-118.

Silva, F. C.; Guimaraes, D.H.P.; Gasparetto C.A. (2005). Reologia do Suco de Acerola: Efeito da Concentração e da Temperatura. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 25(1):121-126.

Sikora, M.; Kowalski, S.; Krystyjan, M.; Krawontka, J. y Sady, M. (2007). "Optimization of cornstarch/xanthan gum content for thickening cocoa syrups". *Journal of Food Quality*, 30 (5): 682-702.

Sotelo, I.; N. Casas.; G. Camelo. (2010). Borojó (*Borojoa patinoi*): Fuente de polifenoles con actividad microbiana. *Revista Vitae*, 17(3):329-336.

Smith, P.G. (2011). *Introduction to Food Process Engineering*. Second Edition. Editorial Springer-Verlag, 510 p.

Steffe, J.F. (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering*, 2nd Ed. Freeman Press, East Lansing, Michigan State, USA. 418 p.

Stone, H.; Sidel J.L. (1995). Strategic applications for sensory evaluation in a global market. *Food Technology*, 49: 80-85.

Subramanian, R.; Muthukumarappan, K.; Gunasekaran, S. (2006). Linear viscoelastic properties of regular- and reduced- fat pasteurized processed cheese during heating and cooling. *International Journal of Food Properties*, 9:377–393.

Tabilo-Munizaga, G.; Barbosa-Canovas, G.V. (2005). Rheology for the food industry. *Journal of Food Engineering*, 67:147-156.

Tanglertpaibul, T.; Rao, M. A. (1987). Rheological properties of tomato concentrates as affected by particle size and methods of concentration. *Journal of Food Science*, 52:141-145.

Tiu, C.; Boger, D.V. (1974). Complete rheological characterization of time-dependent food products. *Journal of Texture Studies*, 5:329-338.

Toralles, R.; J. Vendruscolo.; C. Vendruscolo. (2006). Reol6gia de purê homogeneizado de Pêssego: Efeito da temperatura e concentraç6o. *Brazilian Journal Food Technology*, 9 (1): 1-8.

Tsoga,A.; Richardson, R.K.; Morris,E.R. (2004). Role of cosolutes in gelation of high-methoxy pectin. Part 1. Comparison of sugars and polyols. *Food Hydrocolloids*, 18:907-919.

Truong, V.D.; Walter Jr., W.M. (1994). Physical and sensory properties of sweetpotato puree texturized with cellulose derivatives. *Journal of Food Science*, 59: 1175-1 180.

Tung, M.A.; Paulson, A.T. (1995). Rheological concepts for probing ingredient interactions in food systems. In: *Ingredient Interactions: Effects on Food Quality*, Gaonkar, A. (ed.), Marcel Dekker, New York.

Van Wazer, J.R.; Lyons, J.N.; Colwel, R.E. (1963). *Viscosity and flow measurements*, Interscience Publishers (ed), New York.

Varela, P.; Salvador, A.; Fiszman, S. (2005). Shelf-life estimation of 'Fuji' apples: sensory characteristics and consumer acceptability. *Postharvest Biology and Technology*, 38(1): 18-24.

Vidal, J.R.M.B. (1996). Estudio reológico do suco de manga: efeito dos sólidos insolúveis. 81p. Tese de Mestrado, FEA/UNICAMP. Campinas, (SP).

Vidal, J.; D. Pelegri.; C. Gasparetto. (2004) Effect of the rheological behavior of mango pulp (*Mangifera indica* L-Keitt). *Revista Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 24(1):39-42.

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

Vitali, A. A.; Rao, M. A. (1984). Flow properties of low-pulp concentrated orange juice: effect of temperature and concentration. *Journal of Food Science*, 49:882-888.

Wang, H.H.; Sun, D. W. (1999). Flow behavior and rheological models of rice flour pastes, *Journal of Food Process Engineering*, 22: 191-200.

Watts, B.M.; Ylimaki, G.L.; Jeffery, L.E.; Elías, L.G. (1992). Métodos sensoriales básicos para la evaluación de alimentos. Ottawa: CIID, 170 p.

White, G. W. (1970). Rheology in food research. *Journal of Food Technology*. 5:1-32.

Whorlow, R.W. (1992). *Rheological techniques*, Ellis Horwood (ed), New York.

Yeow, Y.L.; Perona, P.; Leong, Y.K. (2002). A reliable method of extracting the rheological properties of fruit purees from loop data. *Journal of Food Science*, 67:1407-1411.

CAPÍTULO 7

ANEXOS

7.1 Publicaciones derivadas de la Tesis Doctoral

7.1.1 Artículos científicos

- ✓ Díaz-Ocampo, R.; García-Zapateiro, L., R.; Franco, J.M. (2012). Caracterización bromatológica, fisicoquímica, microbiológica y reológica de la pulpa de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.). Ciencia y Tecnología, 5(1):17-24.
- ✓ Díaz-Ocampo, R.; Sánchez, R.; Franco, J.M. (2014). Rheology of commercial and model borojo jam formulations. International Journal of Food Properties, 17:791-805.
- ✓ Díaz-Ocampo, R.; Sánchez, R.; Franco, J.M. Rheological properties of borjón pulp-based smoothies: Influence of solid content and temperature. (en preparación).

7.2 Propuestas de trabajo futuro derivadas de la Tesis Doctoral

A continuación se describen las líneas de trabajo futuras sugeridas para dar continuidad a los trabajos realizados en esta tesis:

- ✓ Optimización de las variables de procesado de mermeladas y batidos elaborados a partir de la pulpa de borjón (*Borojoa patinoi* Cuatrec.), condiciones de calentamiento, evaporización, así como de escalado, a fin de implantar su producción a nivel industrial.
- ✓ Evaluación del efecto final que se obtiene sobre mermeladas y batidos cuando se modifican parámetros en el proceso de su elaboración y se adicionan otros ingredientes, buscando de esta forma una mejora en aquellas propiedades que limitan el uso de las formulaciones estudiadas.

- ✓ Ampliación del estudio reológico a otros productos derivados de la pulpa de borojó (*Borojoa patinoi* Cuatrec.), como jaleas, salsas para aderezos y vino, con el objetivo de conocer su comportamiento de flujo.

7.3 Trabajos de investigación desarrollados a partir de la Tesis Doctoral

CARACTERIZACIÓN BROMATOLÓGICA, FÍSICOQUÍMICA MICROBIOLÓGICA Y REOLÓGICA DE LA PULPA DE BOROJÓ (*Borojoa patinoi* Cuatrec)

CHARACTERIZATION BROMATOLOGICAL, PHYSICO-CHEMICAL, MICROBIOLOGICAL AND RHEOLOGICAL IN BOROJO PULP (*Borojoa patinoi* Cuatrec)

ªRaúl Díaz Ocampo¹, Luis García Zapateiro², José María Franco Gómez³, Christian Vallejo Torres¹

¹Carrera de Ingeniería en Alimentos. Facultad de Ciencias Pecuarias, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, km 7 vía Quevedo - El Empalme, C. P. 73. Mocache, Los Ríos, Ecuador. ªrauldiaz63@gmail.com

²Grupo de Investigación Ingeniería de Fluidos Complejos y Reología de Alimentos (IFCRA) Universidad de Cartagena. Facultad de Ingeniería. Cartagena de Indias, Colombia.

³Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Ciencias Experimentales. Campus de "El Carmen". Universidad de Huelva. 21071 Huelva, España.

RESUMEN

En este estudio se presenta la caracterización bromatológica, fisicoquímica, microbiológica y reológica de la pulpa fresca de borojó (*Borojoa patinoi* Cuatrec), que son de interés en el procesamiento industrial. Se analizaron muestras de la pulpa del fruto intacto de borojó, proveniente de la provincia de Los Ríos (Ecuador), el rendimiento de la pulpa fue del 82.3% respecto del total de la fruta. La pulpa presenta un bajo pH, y tiene niveles importantes de carbohidratos y calcio. La pulpa de borojó obtenida fue de óptima calidad microbiológica, con recuentos de microorganismos que están dentro de los rangos permitidos según la normativa. Se realizó la caracterización reológica mediante ensayos de flujo en estado estacionario y ensayos oscilatorios de la pulpa de borojó a diferentes temperaturas. La pulpa de borojó presentó un comportamiento no newtoniano de carácter pseudoplástico, con un comportamiento más elástico que viscoso similar a un gel. Los resultados de los ensayos de flujo y oscilatorios muestran que la temperatura influyó en el comportamiento reológico de la pulpa de borojó.

Palabras clave: Borojó (*Borojoa patinoi* Cuatrec), pulpa, bromatología, microbiología, reología.

ABSTRACT

This research present the characterization bromatological, physico-chemical, microbiological and rheological borojo fresh pulp (*Borojoa patinoi* Cuatrec), which are of interest in the industrial processing of this pulp. Samples of intact borojo pulp were analyzed. These samples are coming from Los Ríos Province (Ecuador), the amount of pulp obtained was 82.3% respecting the whole fruit. The pulp presents a low pH and an important level of carbohydrates and calcium. The borojo pulp obtained was microbiological high quality, with microorganism counts inside the ranges normatively allowed. Rheological behavior is characterized by oscillatory and flow tests at different temperatures. The results showed that the borojo pulp behaves as a non-Newtonian pseudoplastic fluid, where the viscosity has a more elastic behavior than viscous similar to a gel. The results of the tests oscillatory and flow shows that temperature influenced on rheological behavior of borojo pulp.

Key words: Borojo, pulp, bromatological, microbiology, rheology.

INTRODUCCIÓN

Actualmente existe una demanda de alimentos más saludables y un interés comercial por frutas con alto poder nutricional y propiedades nutraceuticas. En este contexto, las frutas amazónicas han ganado un interés notable en el mercado de productos exóticos frescos y procesados, entre ellas el borojó (*Borojoa patinoi* Cuatrec) destaca por sus importantes propiedades

alimenticias, excelentes condiciones de adaptación y por su potencial económico, constituyéndose en importante insumo para la industria alimentaria.

El *B. patinoi* es una especie arbórea perteneciente a la familia Rubiaceae, originaria de América Tropical, restringida al centro de la zona del Ecuador climático, el fruto es una baya carnosa de 7 a 12 cm de diámetro,

Recibido: 14-Febrero-2012. Recibido en forma corregida: 23-Abril-2012.
Aceptado: 22-Junio-2012.

Publicado como ARTÍCULO CIENTÍFICO en Ciencia y Tecnología 5(1): 17-24. 2012

Díaz *et al.*

que en sus primeros estadios es de color verde clara y al madurar se torna parda rojiza; tiene un mesocarpio carnosos con sabor aromático y muy perfumado (Giraldo *et al.*, 2004), los frutos tienen un peso promedio de 740 g, constituidos por pulpa, semilla y cáscara, con frecuencia, las semillas llegan a constituir hasta un 10% del peso del fruto (Jaramillo *et al.*, 2005).

Tradicionalmente las comunidades indígenas asentadas en la zona amazónica de donde proviene el *B. patinoi*, lo han utilizado como alimento y producto curativo; entre los usos medicinales se menciona que es satisfactorio para cicatrizar heridas, controlar el azúcar en la sangre o la hipertensión. Estas comunidades lo consideran un alimento con alto valor nutritivo por su alto contenido en minerales, más que por el sabor de la fruta. (Hollihan, 2004).

Este fruto es comúnmente utilizado en América del Sur, en productos como jugos, pulpas y mermeladas, por su alto contenido de sólidos y bajo pH. A pesar de ser una fruta poco perecedera y de alta disponibilidad en su medio natural, el *B. patinoi* es un producto de difícil manejo debido a su consistencia y peso, por tal razón, se hace necesario emplear diversos métodos para la manipulación, entre estos el despulpado. La pulpa de *B. patinoi* es altamente energética y nutritiva, con alto contenido de sólidos solubles, proteínas, aminoácidos y fósforo (Mosquera *et al.*, 2005).

La pulpa es de color café, ácida y densa. Su nombre proviene del dialecto citara y significa "árbol de cabeza colgante" (Millán *et al.*, 2010), es el producto carnosos y comestible de la fruta, obtenido por procesos tecnológicos adecuados de buenas prácticas de postcosecha y manufactura (INEN, 2008).

La pulpa de la fruta madura de *B. patinoi* puede conservarse al ambiente o en nevera, y en envases herméticos por hasta seis meses sin necesidad de aditivos. La parte comestible del *B. patinoi* puede ser procesada en forma de pulpa o de hojuelas deshidratadas, la pulpa es muy adhesiva, por lo que deben utilizarse envases de plástico o de vidrio. Se han estudiado algunas características de las propiedades funcionales de la pulpa obtenida mediante el secado por aspersión y el efecto de la maltodextrina en la estabilidad de la pulpa de *B. patinoi* seca por liofilización (Mosquera *et al.*, 2010).

En la superficie del fruto o de la pulpa se desarrollan frecuentemente micelios de hongos, probablemente *Aspergillus* y *Penicillium*, la cual debe ser prevenida mediante un buen lavado y desinfección antes del despulpado. En el fruto estos hongos no causan daño, porque no pasan el pericarpio (Mejía, 1984).

El contenido de sólidos solubles, la firmeza de los frutos, el color de la pulpa, el contenido de fibra de raíces y tallos, el grado de turgencia que presentan al ser

procesados, son algunos de los atributos que inciden en la calidad industrial de la materia prima.

El *B. patinoi* se encuentra en una etapa de introducción en Ecuador ya que es una planta que se desarrolla en condiciones óptimas en las regiones tropicales húmedas, es bastante resistente a plagas y enfermedades y de fácil adaptación. La explotación se divide principalmente a nivel de monocultivo, en cultivo asociado con otras especies o la producción de árboles dispersos, empezando a mostrar gran interés los productores agrícolas para domesticarlo y producirlo intensivamente.

Debido a la aceptación y comercialización cada vez más creciente de los productos derivados del *B. patinoi*, se requiere una información científica más amplia sobre las características de esta fruta, por ello se considera interesante el estudio del comportamiento reológico de la pulpa de esta fruta para su caracterización y utilización en el desarrollo de nuevos productos. Las características reológicas de un fluido complejo es uno de los criterios esenciales en el desarrollo de productos en la industria alimentaria, en el control de calidad, así como en la comprensión y caracterización de atributos texturales. Las propiedades reológicas de los distintos alimentos, normalmente tienen gran importancia en el procesado, transporte y almacenamiento (Steffe, 1996).

Numerosas investigaciones en reología de alimentos confirman la variedad de comportamientos de flujo encontrados en sistemas alimentarios. Los fluidos no newtonianos exhiben un comportamiento de flujo que depende de la velocidad de cizalla y, generalmente, del tiempo, como consecuencia de cambios estructurales (Steffe, 1996). En el caso de fluidos pseudoplásticos, la viscosidad aparente desciende a medida que aumenta la velocidad de cizalla (Muller, 1973).

Por otra parte, la mayoría de los alimentos microestructurados muestran características visco-elásticas. Una forma frecuente de caracterizar el comportamiento reológico de alimentos en la región de viscoelasticidad lineal es mediante ensayos en cizalla oscilatoria (Steffe, 1996), donde se aplica una deformación oscilatoria de pequeña amplitud sobre el material y se registra la respuesta del esfuerzo, o viceversa, así como el ángulo de fase entre el esfuerzo cortante y la deformación. Este tipo de ensayos permiten determinar la relación entre las componentes elásticas y viscosas y caracterizar el tipo de material de acuerdo a la evolución de los módulos de almacenamiento, G' , y pérdidas, G'' , que representan el comportamiento elástico y viscoso, respectivamente (Barbosa-Cánovas *et al.*, 1993).

En este trabajo se aborda el estudio de las propiedades y características bromatológicas, fisico-químicas, microbiológicas y reológicas de la pulpa

fresca de *B. patinoi*, como un aporte a la ciencia y la caracterización de esta fruta de origen amazónico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materia prima

El tamaño de las muestras de pulpa fresca para los ensayos de caracterización bromatológica, fisicoquímica, microbiológica y reológica fue de 3 kg. Los lotes se obtuvieron de fincas aledañas al cantón Mocache, Provincia de Los Ríos (Ecuador).

Se escogieron al azar frutos maduros visiblemente sanos, se transportaron a los Laboratorios de Bromatología de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo y de la Escuela Politécnica Nacional. La materia prima se pesó, se lavó para eliminar materiales extraños, los frutos se cortaron en mitades longitudinales y se realizó el despulpado de forma manual eliminándose la corteza y semillas. Las muestras fueron evaluadas por duplicado.

Caracterización bromatológica y fisicoquímica

Los análisis bromatológicos y fisicoquímicos se realizaron en base seca por duplicado, utilizando métodos normalizados (AOAC, 2000):

Humedad. La humedad se determinó en una estufa de vacío Heraeus a 70° C y 100 mm Hg, según el método 920.151.

Cenizas. Para su determinación se utilizó una mufia Lindberg a 525° C, por el método 940.26.

Extracto etéreo. Se determinó en un extractor de grasas con éter de petróleo tipo Goldfisch, marca Labconco, según el método 920.85.

Proteínas. Se determinaron con un equipo Kjeltac 1002, marca Tecator, de acuerdo al método 2001.11.

Sólidos solubles. El contenido de sólidos solubles se determinó mediante lectura directa en un refractómetro Zeiss-Abbe a 20° C, según el método 932.12.

Acidez total titulable. Se determinó como ácido málico, según el método 942.15.

pH. Se determinó pH por lectura directa en el pH-metro Orión, a 25° C, según el método 981.12.

Fibra cruda. Fue determinada por hidrólisis y filtración, según el método 113 (ICC, 2001).

Carbohidratos totales. Se calculó teóricamente su valor de acuerdo al método descrito por Hart y Fisher (1991).

Valor energético. Se realizó el cálculo teórico según la Tabla de Composición de Alimentos de Centro América (INCAP, 2007).

Fósforo. Se determinó el contenido en fósforo mediante

espectrofotometría (Ranganna, 1977).

Hierro y fósforo. Se determinaron por digestión en vía microondas y lectura en espectrofotómetro de absorción atómica (DECAB-EPN, 2007).

Los resultados de la caracterización bromatológica y fisicoquímica se presentan en forma de valor medio y desviación estándar.

Evaluación microbiológica

Las normas de pulpas de frutas recomiendan también la determinación del recuento de aerobios mesófilos, coliformes totales, hongos y levaduras. Los análisis microbiológicos se realizaron por duplicado, utilizando métodos normalizados (FDA-CFSAN-BAM):

Recuento total de aerobios. Se utilizó un medio de cultivo de Plate Count Agar, con incubación a 35° C durante 48 horas (FDA-CFSAN-BAM, 2001).

Recuento de coliformes fecales. Se utilizó un medio de cultivo de Agar Rojo Bilis Violeta, con incubación a 35° C durante 24 horas (FDA-CFSAN-BAM, 2002).

Recuento de hongos y levaduras. Se utilizó un medio de cultivo de Diclorán D G18, con incubación a 25° C, durante 7 días (FDA-CFSAN-BAM, 2001).

Evaluación reológica

Se realizaron ensayos de flujo estacionario obteniendo curvas de viscosidad η a temperaturas de 0, 10, 25, 40 y 60° C en reómetros de esfuerzo controlado Rheostress RS-150 y MARS (Modulate Advanced Rheometer System) de ThermoHaake (Karlsruhe-Alemania), en un rango de esfuerzos aplicados de 10-3,500 Pa, usando una geometría placa-placa de superficie rugosa de 35 mm y separación entre placas de 1.0 mm.

En este estudio, previo a la medición, todas las muestras se dejaron en reposo durante 15 min para permitir la relajación de las mismas, la temperatura de las muestras se mantuvo constante a $20 \pm 0.1^\circ \text{C}$, mediante un sistema Peltier para el control de temperatura.

Se utilizó el método dinámico para el estudio de las propiedades viscoelásticas de la pulpa de *B. patinoi*, se realizaron ensayos dentro del rango de viscoelasticidad lineal, en un reómetro de deformación controlada ARES de la firma TA Instruments (New Jersey-USA) a 25, 40 y 60° C, en un rango de frecuencia comprendido entre 0.03 y 75.36 rad s^{-1} , usando una geometría placa-placa (25 mm diámetro, separación de 1.2 mm). Los parámetros viscoelásticos obtenidos fueron módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y

Díaz *et al.*

tangente de ángulo de fase ($\tan \delta$).

Previamente, se realizaron barridos de deformación a una frecuencia de 1 rad s^{-1} , a fin de determinar el intervalo de viscoelasticidad lineal. La deformación límite del intervalo lineal se encuentra en la $\tan \delta$ de 2–3%. El barrido de frecuencia se aplicó a una deformación del 1%

Diseño de experimentos y análisis estadístico

Se utilizó un diseño de experimentos completamente al azar, a todos los datos generados de las determinaciones se les realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con un grado de confiabilidad del 95%. Para analizar datos y crear gráficas se utilizó el programa OriginLab Pro 8.0 (Origin Lab. Corporation Northampton, MA 01060).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El balance de masa realizado, permitió establecer que se puede obtener un rendimiento promedio del 82.3% de pulpa, siendo el resto la parte no comestible del fruto (corteza y semillas).

Composición bromatológica y fisicoquímica

La composición bromatológica y fisicoquímica de la pulpa fresca de *B. patinoi* analizada se presenta en el cuadro 1.

Cuadro 1. Componentes bromatológicos y fisicoquímicos de la pulpa fresca de *B. patinoi*

Componentes / Unidades	Resultados
Humedad (%)	69.41±0.26 ²
Sólidos solubles °Brix a 20° C	32.00±0.96
Cenizas (%) ¹	0.73±0.01
pH	2.93±0.09
Acidez titulable (% como ácido málico)	2.60±0.05
Carbohidratos totales (%) ¹	29.03±3.40
Extracto etéreo (%) ¹	0.06±0.01
Proteína (%) ¹	0.78±0.02
Fibra cruda (%) ¹	3.50±0.14
Fósforo (mg 100 g ⁻¹) ¹	1.82±0.07
Hierro(mg 100 g ⁻¹) ¹	0.69±0.09
Calcio(mg 100 g ⁻¹) ¹	17.70±2.65
Valor energético (Calorías)	108.00±0.71

¹Base seca

²Desviación estándar

De la caracterización bromatológica y fisicoquímica de la pulpa de *B. patinoi* se puede concluir que el contenido de humedad obtenido en la pulpa fresca de *B. patinoi* coincide con los valores reportados en la literatura: de 69% (Mejía, 1984) y de 64.83% (Mosquera, 2005). Este contenido en humedad favorece el procesamiento de néctar, vino y otros.

El porcentaje de sólidos solubles fue de 32° Brix, igualmente, similar al publicado por Mejía (1984) para el mismo material (29 a 41° Brix).

El contenido de cenizas de la muestra de pulpa de *B. patinoi* analizada, también concuerda aproximadamente con valores publicados de 0.8 a 1.2% (Mejía, 1984) y de 0.801% (Sotelo *et al.*, 2010). El porcentaje de cenizas está asociado al contenido mineral y en general depende del manejo agronómico del cultivo.

El pH obtenido es similar a los reportados por otros autores en la pulpa de esta fruta: de 2.8 a 3.0 (Mejía, 1984) y de 3.08 (Jaramillo *et al.*, 2005). La pulpa de *B. patinoi* presenta valores inferiores a los hallados en frutos como el noni (Chan-Blanco, 2006), perteneciente también a la familia de las Rubiáceas. El pH es importante en el control del desarrollo de poblaciones de microorganismos, de la actividad de sistemas enzimáticos, en el proceso de clarificación de jugos y bebidas, en la estabilidad de los mismos y de otros productos elaborados a partir de pulpa de frutas como jaleas y mermeladas, cuya firmeza, color y sabor están determinados por la concentración de iones hidrógeno.

La acidez titulable de la pulpa de *B. patinoi* fue de 2.6 menor a los valores reportados por otros autores: de 3.0 (Mejía, 1984) y de 3.08 (Jaramillo *et al.*, 2005).

El cálculo de carbohidratos totales en la pulpa de *B. patinoi* refleja un alto contenido de carbohidratos, superior a 13.86% reportado por Jaramillo *et al.* (2005). El contenido de carbohidratos totales influye notablemente en el sabor de las frutas y es uno de los factores intrínsecos que favorece el crecimiento de las poblaciones de bacterias y mohos propios de la microflora (Jay, 1992).

Se encontró en la pulpa de *B. patinoi* un contenido de extracto etéreo de 0.06%, valor similar al reportado de 0.04% por Arango *et al.* (1986) e inferior al encontrado de 0.83% por Salamanca *et al.* (2010). En general las frutas y los vegetales contienen muy bajas concentraciones de contenido graso, aunque existen algunas excepciones, tales como el aguacate, aceitunas, y algunas nueces, que en promedio tienen 20% de lípidos (Badui, 1996).

El contenido proteico bajo de la pulpa de *B. patinoi* indica ser inapropiada como fuente proteica por ser inferior a los valores reportados en un rango de 0.8% a 1.3% por Mejía (1984) y de 1.75% (Mosquera, 2005).

La pulpa de *B. patinoi* estudiada presentó un valor de fibra cruda, inferior al valor de 10% encontrado por Mejía (1984) y de 9.8% por Mosquera (2005).

Los resultados de calcio y hierro de la pulpa analizada se asemejan a los valores reportados por Mejía (1984) y Jaramillo *et al.* (2005).

La cantidad de fósforo, es inferior al valor de 160 mg 100 g⁻¹ reportado por Mejía (1984) y 130 mg 100 g⁻¹ (Mosquera, 2010). El valor energético de la pulpa de *B. patinoi* concuerdan con el valor reportado por Mejía (1984). Aunque el valor energético total de las frutas es menos importante que en otros alimentos, es destacable que el valor energético de la pulpa de *B. patinoi* de 108 Cal, es más alto que en pulpas de otras frutas amazónicas, como mamey, marañón y anona (Cavalcante, 1991). Se concluye que la pulpa fresca de *B. patinoi* presenta condiciones favorables para la industria alimentaria debido a su bajo pH, nivel importante de carbohidratos y calcio.

Características microbiológicas

Las características microbiológicas de la pulpa fresca de *B. patinoi* se presentan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Características microbiológicas (Unidades Formadoras de Colonias por gramo de muestra) de la pulpa fresca de *B. patinoi*

Microorganismo	Resultados
Aerobios mesófilos	<1x10 ⁴
Coliformes totales	<1x10 ⁴
Hongos	410
Levaduras	30

<1x10⁴= indica no desarrollo de colonias. Dilución 1:10

El recuento de aerobios mesófilos a partir del cual se perciben modificaciones en los atributos organolépticos del producto es de 10⁶ UFC g⁻¹. En la pulpa evaluada el recuento es muy inferior y, en cualquier caso, no se detectaron alteraciones organolépticas. Por otra parte, los recuentos de hongos y levaduras que son indicadores del deterioro de frutas y vegetales están dentro de los rangos permitidos en la normativa ecuatoriana (INEN 2 337, 2008). Por los resultados microbiológicos obtenidos se puede afirmar que la pulpa fresca de *B. patinoi* fue de óptima calidad

microbiológica.

Caracterización reológica

Ensayos en flujo estacionario. Se llevaron a cabo ensayos en flujo estacionario, a diferentes temperaturas, observando la variación de la viscosidad con la velocidad de corte. En la figura 1 se pueden observar las curvas de flujo viscoso de la pulpa de *B. patinoi*, en función de la velocidad de corte, a temperaturas comprendidas entre 0 y 60° C.

Los resultados obtenidos a diferentes temperaturas de 0, 10, 25, 40 y 60° C, demuestran un comportamiento pseudoplástico, ya que combinan características propias de los sólidos elásticos y de los líquidos, caracterizado por un descenso potencial de la viscosidad con la velocidad de corte (Muller, 1973).

Por otra parte, no se observan diferencias significativas de la viscosidad aparente con la temperatura, con valores de η₀ muy similares, en un rango de 4x10⁶ Pa s a 5x10⁶ Pa s. El anterior valor, es indicativo de la viscosidad del material en situaciones de reposo o movimientos sumamente lentos.

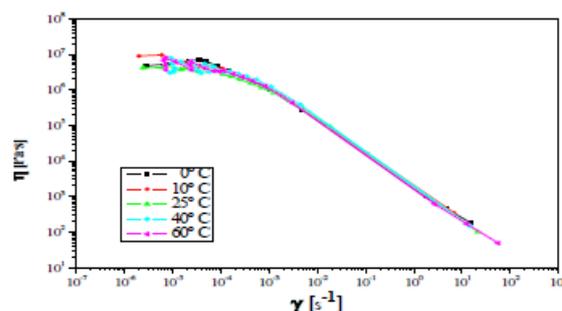


Figura 1. Curvas de flujo viscoso de la pulpa de *B. patinoi* a diferentes temperaturas.

La naturaleza de la pectina y la cantidad de partículas dispersas son determinantes principales en las propiedades de flujo de las pulpas. Este comportamiento pseudoplástico puede ser explicado por la ruptura de una estructura reticular de moléculas de polisacáridos durante el cizallamiento, tal y como describen Morris *et al.* (1981) y Bhandari *et al.* (2002). En un sistema reticular, la velocidad de ruptura de las interacciones moleculares existentes es superior a la velocidad de reformación de las mismas con el aumento de la velocidad de deformación. El resultado es una menor resistencia intermolecular al flujo y, por tanto, una menor viscosidad.

Este mismo comportamiento se ha observado en diferentes alimentos derivados de la pulpa de otros

Díaz *et al.*

frutos, tales como pulpa de guayaba (Hamman, 2001), puré de guayaba (Vitali y Rao, 1982), en purés de mango, papaya y melocotón (Guerrero y Alzamora, 1998).

Ensayos oscilatorios. Se efectuaron por triplicados ensayos de barrido de deformación a 25° C para determinar la región viscoelástica lineal de la pulpa de *B. patinoi* como se muestra en la figura 2.

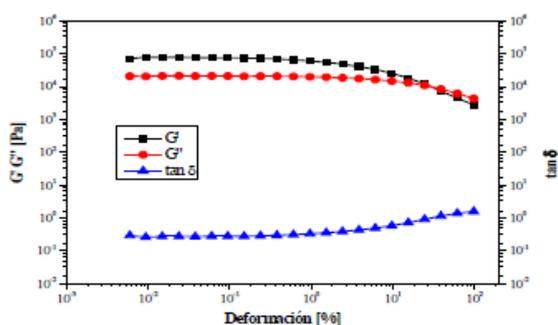


Figura 2. Módulo de almacenamiento (G'), módulo de pérdida (G'') y $\tan \delta$ en función de la deformación relativa de la pulpa de *B. patinoi*, a 1 Hz de frecuencia y 25° C.

Donde se pudo establecer el rango lineal de la muestra para poder realizar los ensayos de barrido de frecuencia a diferentes temperaturas tomando como deformación relativa 1%. El comportamiento de los módulos de almacenamiento G' (componente elástico) y pérdida G'' (componente viscoso) se muestran en la figura 3.

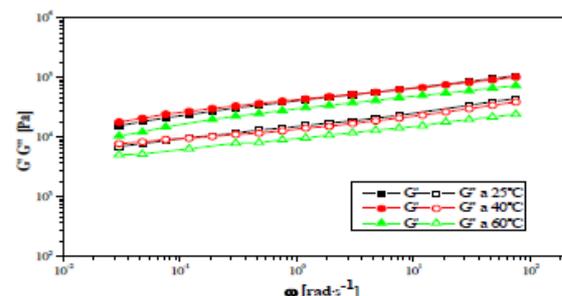


Figura 3. Módulo de almacenamiento (G') y Módulo de pérdida (G'') de la pulpa fresca de *B. patinoi* en función de la frecuencia a diferentes temperaturas.

Como puede observarse en la figura 3, los valores de G' son mayores que los de G'' , en todo el rango de frecuencias, presentando un comportamiento elástico, donde ambas funciones aumentan ligeramente con la frecuencia de forma casi paralela, similar al que

se presenta en diversos alimentos como en las masas elaboradas con harinas de distintas variedades de trigos suaves (Magaña-Barajas *et al.*, 2009).

En el cuadro 3 se muestran los valores de G' , G'' y de $\tan \delta$ en de la pulpa fresca de *B. patinoi* a una frecuencia de 30 rad s^{-1} , a diferentes temperaturas. Se observa en todos los casos que $G' > G''$, lo cual demuestra un comportamiento elástico y a medida que se incrementa la temperatura disminuye el valor de G' y G'' , aumentando su comportamiento viscoso determinado con el valor de $\tan \delta$, por los resultados indica que es dependiente de la temperatura.

Cuadro 3. Parámetros viscoelásticos de la pulpa fresca de *B. patinoi* a una frecuencia de 30 rad s^{-1} , a diferentes temperaturas

T(°C)	G' (Pa)	G'' (Pa)	$\tan \delta$
25	94671	37282	0.396
40	80995	29400	0.363
60	54460	18186	0.342

La $\tan \delta$ se obtiene de la relación G''/G' y toma valores de 0 a 1 predominando un carácter elástico.

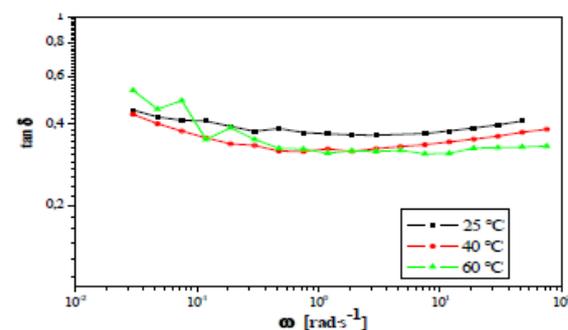


Figura 4. Tangente de ángulo de fase ($\tan \delta$) en función de la frecuencia a diferentes temperaturas de la pulpa fresca de *B. patinoi*.

La $\tan \delta$ es una medida adimensional que compara la cantidad de energía perdida durante un ensayo oscilatorio con la cantidad de energía almacenada durante este periodo, e indica si predomina la propiedad elástica o viscosa (Mota y Ibarz, 2006). Se observa en la figura 4, que en función de la frecuencia y con el incremento de la temperatura, el valor de $\tan \delta$ de la pulpa fresca de *B. patinoi* presenta un ligero descenso, en cambio al aumentar el valor de la frecuencia también se incrementa ligeramente el valor de $\tan \delta$ para todas las temperaturas, lo que confirma para altas temperaturas el predominio de propiedades elásticas.

Así, el comportamiento viscoelástico lineal mostrado por la muestra de pulpa de *B. patinoi* es similar al observado en otras pulpas de frutas, como mango (Pelegre *et al.*, 2002; Branco *et al.*, 2003; Vidal *et al.*, 2004 y Dak *et al.*, 2007), guayaba (Ferreira *et al.*, 2002 y Medina y Pagano, 2003), cereza (Da Silva *et al.*, 2005), membrillo (Mota y Ibarz, 2006). Por otra parte, de forma análoga a lo que ocurre con la viscosidad, la respuesta viscoelástica de la pulpa de *B. patinoi* no está influenciada de forma significativa por la temperatura. Como se observa (Figuras 2 y 3), los parámetros viscoelásticos G' , G'' y $\tan \delta$ tuvieron un comportamiento similar disminuyendo ligeramente su valor con el incremento de la temperatura.

CONCLUSIONES

El rendimiento de la pulpa obtenida fue del 82.3%. La caracterización bromatológica y fisicoquímica de la pulpa fresca de *B. patinoi* permite catalogarla como ácida, con un buen nivel de calcio y constituye una fuente energética de importancia debido al alto contenido de carbohidratos.

Los recuentos de microorganismos permiten concluir que la pulpa fresca de *B. patinoi* es de óptima calidad microbiológica. El pH de 2.93 y la protección que brinda la corteza de la fruta, es un elemento o factor intrínseco que restringe el crecimiento de las poblaciones de microorganismos.

La pulpa de *B. patinoi* se comporta como un fluido no newtoniano pseudoplástico, donde la viscosidad disminuye con la velocidad de corte y presenta un comportamiento viscoelástico tipo gel, donde predomina su parte elástica.

La temperatura influyó en los comportamientos viscoso y viscoelástico de la pulpa de *B. patinoi*.

LITERATURA CITADA

- AOAC. Association of Official Analytical Chemist. 2000. Official Methods of Analysis (17 th.Ed). Gaithersburg, MD, USA.
- Arango, A. y T. Quijano. 1986. Estudio de los frutos de *Borojoa Patinoi* C. Revista Latin Química 17(3):167-169.
- Badui, S. 1996. Química de los Alimentos. Longman/ Alhambra Mexicana. México. 645 p.
- Barbosa-Cánovas, G. V., A. Ibarz, y M. Peleg. 1993. Propiedades reológicas de alimentos fluidos. Revisión Alimentaria 242:39-89.
- Bhandari, P. N., R. S. Singhal and D. D. Kale. 2002. "Effect of succinylation on the rheological profile of starch pastes". Carbohydrate Polymers 47:365-371.
- Cavalcante, RV.1991. Frutas comestíveis da Amazônia. (5 Ed.). CEJUP, Museo Paraense E. Goeldi, Belém. 273 p.
- Chan-Blanco, Y., F. Vaillant, A. Pérez, M. Reynesc, J. Brillouet y P. Brat. 2006. The noni fruit (*Morinda citrifolia* L.): A review of agricultural research, nutritional and therapeutic properties. Journal Food Compos Analysis 19(6):645-654.
- Da Silva F., D. Guimaraes y C. Gasparetto. 2005. Rheology of acerola juice: effects of concentration and temperature. Ciência e Tecnologia de Alimentos 25(1):121-126.
- DECAB- EPN. 2007. Métodos analíticos. Escuela Politécnica Nacional. Quito. p. 1-9.
- FDA-CFSAN-BAM (Food and Drug Administration-Center for Food Safety and Applied Nutrition-Bacteriological Analytical Manual). 2001. Washington, USA. Chapter 3 Conventional Plate Count. p. 1-7.
- FDA-CFSAN-BAM (Food and Drug Administration-Center for Food Safety and Applied Nutrition-Bacteriological Analytical Manual). 2001. Washington, USA. Chapter 18. Yeast and Molds. p. 1-13.
- FDA-CFSAN-BAM (Food and Drug Administration-Center for Food Safety and Applied Nutrition-Bacteriological Analytical Manual). 2002. Washington, USA. Chapter 4. Enumeration of *Escherichia Coli* and the Coliform Bacteria. p. 1-14.
- Ferreira, G., A. Melo, R. Silvestre y C. Gasparetto. 2002. Efeito da temperatura no comportamento reológico das polpas de caju e goiaba. Revista Ciencias Exatas e Naturais 4(2):175-184.
- Giraldo, C., L. Rengifo, E. Aguilar, D. Gaviria y A. Alegria. 2004. Determinación del sexo en borojó (*Borojoa patinoi* C.) mediante marcadores moleculares. Revista Colombiana de Biotecnología 6(2):9-14.
- Guerrero, S. N. y S. M. Alzamora. 1998. Effect of pH, Temperature and Glucose Addition on Flow Behaviour of Fruit Purees: II. Peach, Papaya and Mango Purées. Journal of Food Engineering 37:77-101.
- Hamnan, S. W. 2001. Effect of processing, preservation and storage on rheology of guava pulp. Journal of Texture Studies 32, 271-284.
- Hart, F. L. y H. J. Fisher. 1991. Análisis Moderno de los Alimentos. Zaragoza. 8 p.
- Hollihan, M. 2004. Estudio de mercado para el Borojó. CORPEI. Quito, Ecuador. 27 p.
- I.C.C. 2001. International Association for Cereal Chemistry. 1. Standard 113.
- INCAP (Instituto de Nutrición de Centroamérica

Díaz *et al.*

- y Panamá). 2007. Tabla de composición de alimentos de Centroamérica. (2ª Ed.). Guatemala. p. 16-20.
- INEN. Norma Técnica Ecuatoriana 2337. 2008. Jugos, pulpas, concentrados, néctares, bebidas de frutas y vegetales. Requisitos. Quito, Ecuador.
- Jaramillo, L., M. Arguello, A. Benítez y M. J. Borja. 2005. Ficha Técnica Biocomercio Sostenible en el Ecuador. CORPEI, Eco Ciencia y la iniciativa Biocomercio Sostenible-Ecuador. p. 15-16.
- Jay, J. M., 1992. Modern Food Microbiology. (5th Ed.). Chapman & Hall. p. 38 - 66; 149-176.
- Magaña-Barajas, E., B. Ramírez Wong., L. C. Platt-Lucero., G. A. López Ahumada., P. I. Torres y D. I. Sánchez-Machado. 2009. Caracterización viscoelástica de masas de variedades de trigos suaves. *Tecnol. Ciencia Ed. (IMIQ)* 24(1):12-22.
- Medina, M., y F. Pagano. 2003. Caracterización de la pulpa de guayaba (*Psidium guajava* L.) tipo "Criolla Roja". *Revista Facultad de Agronomía (LUZ)* 20:72-86.
- Mejía, M. 1984. Borojó. *Fruta Ecuatorial Colombiana, Colombia Amazónica* 1(2):89-106.
- Millán, L., B. Cardona, J. A. Herrera, D. Arbeláez, y D. Gutiérrez. 2010. Análisis sensorial e instrumental (textura) a una salsa agridulce de borojó. *Revista Lasallista de Investigación. Corporación Universitaria Lasallista Colombia* 7(1):36-41.
- Morris, E. R., A. Cutler, N. Ross-Murph, S. B. Rees y J. Price. 1981. Concentration and shear-rate dependence of viscosity in random coil polysaccharide solutions. *Carbohydrate Polimer* 1:5-21.
- Mosquera, L. H., H. A. Ríos y P. S. Zapata. 2005. Obtención de una materia prima con valor agregado mediante secado por aspersión a partir del fruto fresco de borojó (*Borojoa patinoi* C.) *Revista Institucional Universidad Tecnológica del Chocó* 11(23):5-10.
- Mosquera, L. H., G. Moraga y N. Martínez-Navarrete. 2010. Effect of maltodextrin on the stability of freeze-dried borojó (*Borojoa patinoi* C.) powder. *Journal Food Engineering* 97(1):72-78.
- Mota, A. y A. Ibarz. 2006. Comportamiento viscoelástico de pulpa de membrillo en función de la concentración de sólidos solubles. *Revista Ciencia y Tecnología de los Alimentos. Campiñas* 26(1):217-219.
- Muller, H.G. 1973. An Introduction to food rheology. Heinemann. London. Cap. 6. p. 57-74.
- Pelegrine, D.H., F. Silva y C. Gasperrato. 2002. Rheological behavior of mango and pineapple pulps. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* 35(1):645-648.
- Ranganna, S. 1977. Manual of Analysis of fruit and vegetable products. New Delhi. Cap.6. p.108-109.
- Salamanca, G., M. P. Osorio y L. M. Montoya. 2010. Elaboración de una bebida funcional de alto valor biológico a base de borojó (*Borojoa patinoi*). *Revista chilena de nutrición* 37(1):89.
- Sotelo, I., N. Casas y G. Camelo. 2010. Borojó (*Borojoa patinoi*): Fuente de polifenoles con actividad microbiana. *Revista Vitae* 17(3):329-336.
- Steffe, J. 1996. Rheological methods in food process engineering (2nd Ed.) East Lansing, USA. 382 p.
- Vidal, J., D. Pelegrine y C. Gasparrato. 2004. Effect of the rheological behavior of mango pulp (*Mangifera indica* L-Keitt). *Revista Ciencia y Tecnología Alimentaria* 24(1):39-42.
- Vitali, A. y M. A. Rao. 1982. Flow behavior of guava puree as function of temperature and concentration. *Journal of Texture Studies* 13:275-289.

RHEOLOGY OF COMMERCIAL AND MODEL BOROJÓ JAM FORMULATIONS

R. Díaz-Ocampo¹, R. Sánchez², and J.M. Franco²

¹Carrera de Ingeniería en Alimentos, Facultad de Ciencias Pecuarias, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Los Ríos, Ecuador

²Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, Huelva, Spain

The rheological behavior of model and commercial borojón (Borojoa patinoi Cuatrec.) jams was analysed as a function of temperature (5–60°C). Model borojón jam formulations were prepared by modifying pectin concentration. Both small-amplitude oscillatory shear and steady flow measurements were performed. Rheological results were also compared with those obtained with a traditional commercial peach jam. The Herschel-Bulkley model was used to describe the steady flow behaviour. In general, all rheological parameters increased with pectin concentration and decreased with temperature. Arrhenius-type relationships were used to quantify the influence of temperature on several viscoelastic and viscous flow parameters. Model borojón jam formulations exhibited higher temperature dependence of linear viscoelastic functions than peach jam samples but lower than borojón commercial jam. The influence of temperature on the yield stress was more important in model borojón formulations than in both commercial jams.

Keywords: Borojón, Jam, Pectin, Rheology, Temperature, Viscoelasticity.

INTRODUCTION

Borojoa patinoi Cuatrec. is an understory tree, i.e., cultivated under a shelter wood system, member of the *Rubiaceae* family, and restricted to tropical climates, especially in humid areas, mainly growing in Panamá, Colombia, and Ecuador. The cultivation system involves low production costs and conserves much of the biodiversity of the natural forest. Borojón is an exotic and apple-sized fruit with some medicinal and aphrodisiacal properties, which command a high price in the local markets and is traditionally used in drinks and other handcrafted preparations.^[1–3] The Borojón fruit weighs around 750 g, between 250 and 1000 g, and consists of pulp, seed, and peel. Often the pulp and seed represent around 83 and 10%, respectively. The pulp is acid, dense, and contains a significant level of carbohydrates, calcium, and soluble solids. Although borojón pulp is currently used to produce processed products like juices, jams, compotes, candies, ice creams, or energy drinks,^[3] the commercialization of such products is very limited to the native countries and their physicochemical, rheological, or textural properties are scarcely investigated. In this

Received 13 December 2011; accepted 22 January 2012.

Address correspondence to J.M. Franco, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Experimentales, Campus de “El Carmen”, Universidad de Huelva, Huelva 21071, Spain. E-mail: franco@uhu.es

respect, recent works^[4,5] have explored the possibility of using the spray-drying and freeze-drying techniques to open up new alternatives for their commercialization in international markets, avoiding some difficulties in handling, transport, and packing.

The rheological, textural, and sensory properties of jam formulations manufactured from other much more universally popular and accepted tropical fruits like pineapple and mango have been reported.^[6–9] The manufacture of borojó jam with suitable physicochemical, sensory, and rheological properties and dissemination of these properties is a way to increase the appraisal of this fruit in other markets. Jam is an intermediate moisture food product obtained by cooking the fruit ingredient mixed with sugar and other ingredients (preservative, colouring, or flavouring agents) and concentrating to get the right consistency, thick enough to hold the tissues.^[10] Jam must contain no less than 65% soluble solids.^[11] Pectin, sugar, acids, and water are present in approximately the following proportions: 0.5–1% added pectin, 50–75% sugar, 1% acid, and 33–38% water (on fruit pulp basis).^[12] One of the factors affecting jam's quality is the pulp content. For instance, in Ecuador, the legislation requires that jam formulations should be made with at least 45% wt. of original fruit.^[11]

Rheology of complex food products plays an important role not only in quality control, determining in many cases the consumer acceptance, but also in the design of unit operations like pumping, mixing, stirring, evaporation, heat exchange, etc.^[13,14] In this sense, a full rheological characterization of such formulations must cover both the viscous flow behaviour and linear viscoelasticity.^[15–17] Jam can be considered a gel-like solid-in-liquid system with a structure that immobilizes the liquid and confers viscoelastic properties.^[17] However, fracture occurrence under large deformations is not clearly detected like in real gels (gelatin, jelly, surimi, etc.). The flow behaviour of most conventional fruit jams has been widely investigated in the past, especially regarding the modeling of the shear stress-shear rate relationship.^[8,18,19] However, less attention has been paid on the time-dependent flow behaviour^[7] and linear viscoelastic properties.^[9] From this existing literature, it can be deduced that the most important factors affecting the rheology of jam formulations are some compositional parameters and interactions among components like pectin and sugar contents and temperature. In this work, the linear viscoelastic response and flow behaviour of commercial and model borojó jam formulations were explored by means of small-amplitude oscillatory shear (SAOS) and steady-state flow measurements, respectively, by analyzing the influences of pectin concentration and temperature. Results were also compared to those obtained with a traditional commercial peach jam.

MATERIALS AND METHODS

Materials and Preparation of Model Jam Formulations

Commercial borojó jam was supplied by Gamboinos factory (Francisco de Orellana, Ecuador). Commercial peach jam (Helios, Spain) was purchased in a local supermarket. Model borojó jam formulations were prepared using borojó pulp previously characterized,^[20] commercial grade sugar purchased in a local supermarket, and high-methoxyl pectin, quick set, 153 USA SAG, Unipectine RS 150 (Cargill Texturizing Solutions, France). Borojó fruits were obtained from Sandrita farm (Los Ríos, Ecuador). Physicochemical characteristics of borojó pulp employed are included in Table 1.

Model borojó jams were prepared using a conventional procedure. The amount of sugar to be added (45:55 pulp/sugar ratio) and the amount of water to be evaporated was

RHEOLOGY OF BOROJÓ JAM FORMULATIONS

793

Table 1 Physicochemical data of original borojón pulp and jam formulations studied.

Parameter	Jam formulations						
	Borojón pulp	Commercial peach jam	Commercial borojón jam	Borojón jam (0.25% pectin)	Borojón jam (0.50% pectin)	Borojón jam (0.75% pectin)	Borojón jam (1.0% pectin)
Moisture (%)	69.41	38.15	28.23	28.03	32.49	32.18	32.74
Ashes (%)	0.73	0.34	0.39	0.33	0.30	0.35	0.32
Soluble solids (°Brix at 20°C)	32.0	68	72	67	65	67	68
pH	2.96	3.16	3.16	3.10	3.11	3.10	3.14
Acidity (g of malic acid/100 g)	2.61	3.24	3.11	3.08	3.09	3.10	3.08

calculated according to the Ecuadorian norm^[11] to reach at least 65 °Brix and 50% pulp in the final product. Borojón pulp used in this work contains 2.6% of pectin (wet basis), and concentrations of high-methoxyl pectin added were 0.25, 0.50, 0.75, and 1% wt. Model jam formulations were prepared on the basis of 250 g of borojón pulp. Initially, 90% of the pulp was mixed at 80°C with only 10% of the total sugar calculated to facilitate evaporation. Pectin was then added before reaching 25 °Brix, in order to favour complete dissolution, previously blended with sucrose in a 1:5 weight ratio, while stirring vigorously. Evaporation was continued at a temperature not exceeding 90°C until 35 °Brix, during 6–10 min at atmospheric pressure. At this time, the rest of the sucrose was added rapidly reaching 65–67 °Brix and then the remaining 10% of borojón pulp was added. Borojón pulp acidity (Table 1) ensures a pH value lower than 3.3 during jam preparation and, therefore, further pH adjustment was not required. Afterwards, borojón jams were packed in 250-mL cylindrical jars at 88°C under vacuum, which were then cooled down to room temperature (25°C) and stored at 4°C.

Physicochemical Characterization

Physicochemical analyses of jam samples studied were performed in duplicate, using standard methods.^[21] The physicochemical variables studied were soluble solids, moisture, ashes, pH, and acidity. Soluble solids content was determined by means of refractometric measurements, at 20°C, in a refractometer (model Abbe, Atago Co. Ltd., Japan), according to the AOAC method 932.12. Moisture was determined in a Thermo Scientific Heraeus vacuum oven, model VT6130 M (Germany), at 70°C and 100 mm Hg, for 24 h (AOAC method 920.151). pH was determined at 25°C in an Orion pH meter (Research Inc., Boston, MA, USA), according to the AOAC method 981.12. The acidity of jam samples was determined by titration and expressed in grams of malic acid per 100 g of jam (AOAC method 942.15). Ash content was determined in a muffle furnace, model Noyo M-525 (Division Barkmeyer, Yucaipa, CA, USA), at 525°C, according to the AOAC method 940.26.

Rheological Characterization

Small-amplitude oscillatory shear (SAOS) tests were conducted in a controlled-stress rheometer (model Rheoscope, ThermoHaake, Germany), within the linear viscoelastic

region using a plate-plate geometry (35 mm diameter, 1 mm gap) in a frequency range of $5 \cdot 10^{-3}$ –16 Hz. Linear viscoelasticity range was previously determined by means of stress sweep tests at 1 Hz. Viscous flow tests were performed in a Physica MCR-501 rheometer (Anton Paar, Austria), which allows a better controlled-rate operation mode ($0.1 \mu\text{N m}$ torque sensitivity), by applying a stepped-shear rate ramp in a range of shear rates of 10^{-2} – 10^2 s^{-1} , using parallel plates (diameter: 25 mm, 1 and 2 mm gaps, depending on sample consistency) with grooved surfaces to overcome wall slip phenomena usually observed in colloidal food systems.^[22,23] Figure 1a shows the comparison of viscous flow curves obtained using both the controlled-rate and the controlled-stress modes for a selected sample. As can be observed, the controlled-rate mode allows the consecution of a more uniform

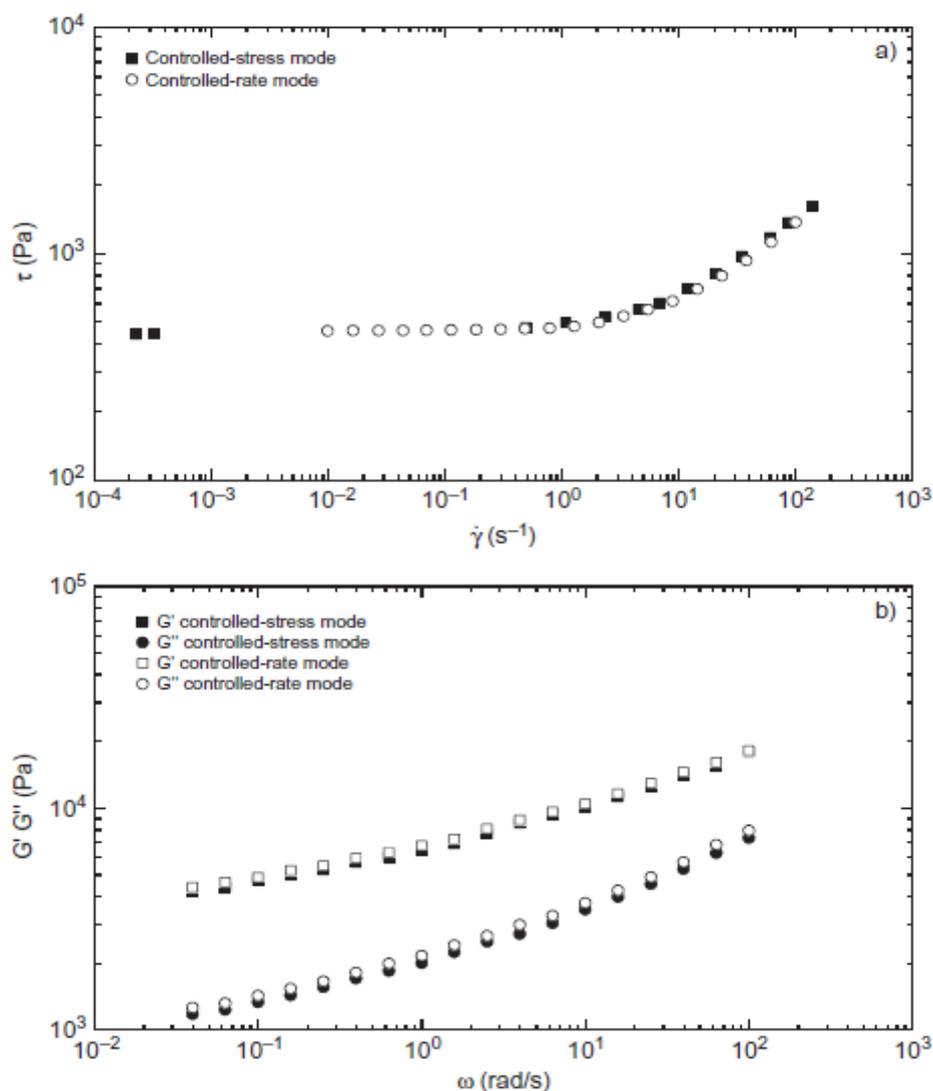


Figure 1 Comparison of measurements carried out using both the controlled-rate (physica rheometer) and the controlled-stress (rheoscope rheometer) modes for a selected model boroj6 jam containing 1.00% added pectin sample. (a) Viscous flow curves; (b) SAOS tests.

distribution of shear stress (or apparent viscosity) data in the whole shear rate range studied, which cannot be obtained in the controlled-stress mode as a consequence of the marked yielding characteristics of the samples studied. Of course, the mechanical spectra obtained in SAOS measurements, inside the linear viscoelastic range, are not influenced by the type of rheometer or operation mode employed (Fig. 1b). All rheological measurements were carried out at temperatures comprised between 0 and 60°C. At least two replicates of each test were performed on fresh samples.

RESULTS AND DISCUSSION

Physicochemical Parameters

Table 1 collects the values of parameters deduced from the physicochemical analysis of the different jam formulations studied. Physicochemical properties of borojó jams were very similar to those of both peach and borojó commercial jams. All model jams were processed to reach a soluble solid content close to 65 °Brix, which is basically the same obtained for the commercial peach jam but slightly lower than that measured in the commercial borojó jam. On the contrary, peach jam showed the highest moisture content.

SAOS Tests

Figure 2 shows the evolution of the storage (G') and loss (G'') moduli with frequency within the linear viscoelastic region for model borojó jam samples formulated with different added pectin concentration at three selected temperatures. These formulations are compared with commercial borojó and peach jams. In all cases, the typical gel-like behaviour with G' values higher than G'' in all the frequency range studied is apparent.^[15] A power-law evolution (with approximate constant slope in log-log plots) with frequency was found for G' , whereas a tendency to reach constant values at low frequencies, i.e., a plateau region, was detected for G'' . The same behaviour was reported for mango jams containing sucrose or sorbitol.^[9] Therefore, neither these viscoelastic functions nor G^* are susceptible to be described through power-law models as previously proposed^[9,24,25] in the whole frequency range. Besides, SAOS functions increased with added pectin concentration. Differences of more than one decade were found by modifying the added pectin content from 0.25 to 1.0%, especially at low temperatures. Moreover, the frequency dependence of both moduli for model formulations is approximately the same to that found in the commercial borojó jam, with very similar values of SAOS functions in the case of jam formulation containing 0.5% pectin at 5°C. However, jam containing 0.25% pectin is more similar to the commercial sample above 25°C. This means that the temperature effect is greater for the commercial borojó jam. A rather different behaviour was shown by the commercial peach jam, which exhibited a much lower frequency dependence of both SAOS functions. Thus, for instance, G' values for this jam are similar to those obtained with model borojó jam formulation containing 0.5% pectin in the low frequency range but are similar to those shown by the borojó jam with 0.25% pectin in the high frequency range, independently of the temperature (Fig. 2). Moreover, the relative elasticity is slightly affected by the pectin content. As can be observed in Fig. 3, the loss tangent ($\tan \delta = G''/G'$) generally decreased with increasing the pectin content, especially at high frequencies. However, all model formulations exhibited $\tan \delta$ values comprised between those found in both commercial formulations analysed.

The effect of temperature on some rheological parameters of different jams has been previously reported,^[7,8,19] although mainly focusing on the viscous flow behaviour. From

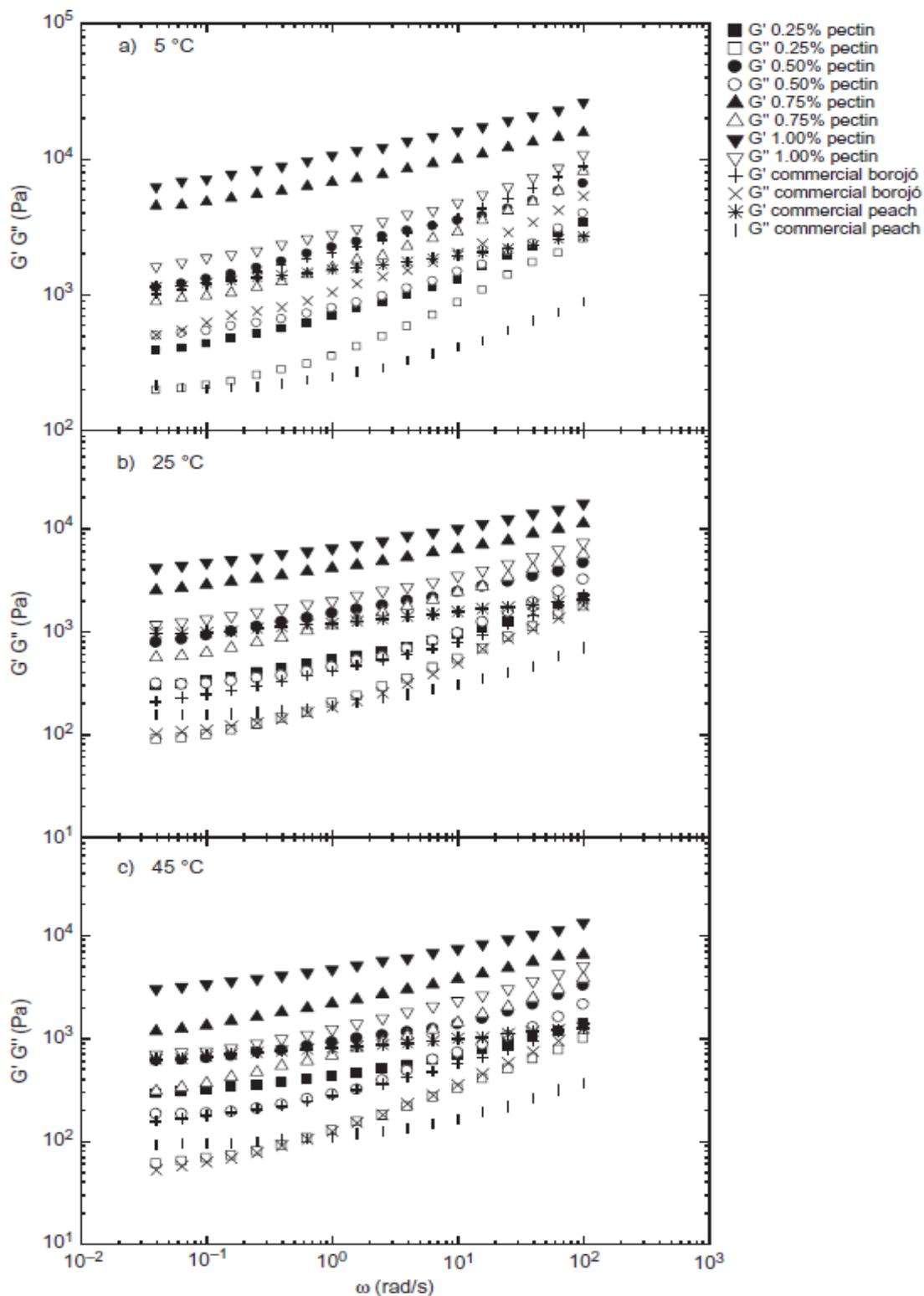


Figure 2 Frequency dependence of SAOS functions for the different jam formulations studied at selected temperatures.

RHEOLOGY OF BOROJÓ JAM FORMULATIONS

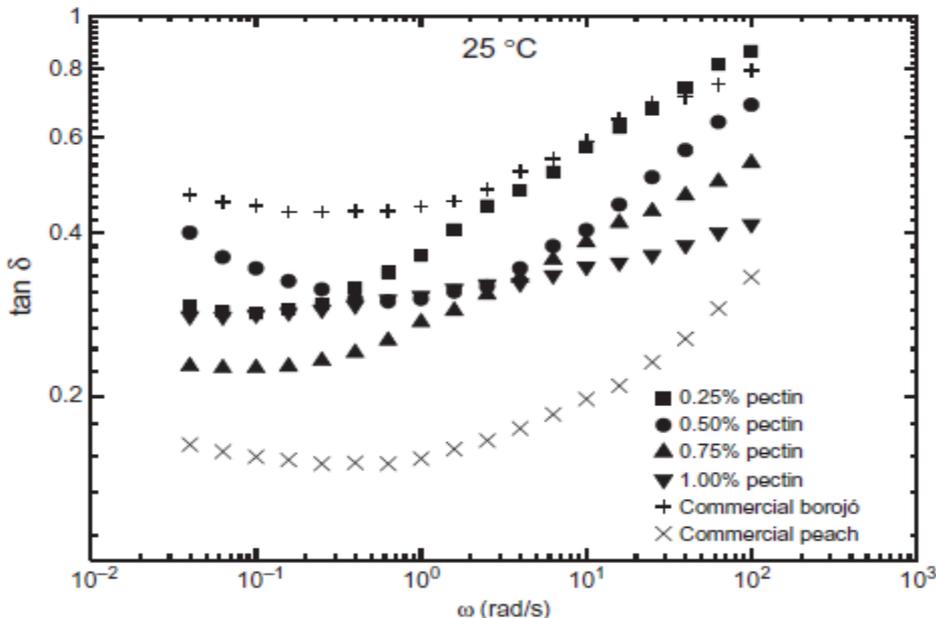


Figure 3 Evolution of the loss tangent with frequency for the different jam formulations studied at 25°C.

Fig. 2, a decrease in the SAOS functions by increasing temperature can be detected. As previously mentioned, the temperature effect seems to be different for model and commercial borjón jams. Temperature influence is much better illustrated in Figs. 4 and 5 for a model (0.75% added pectin) and commercial borjón jams, respectively. As can be seen, the linear viscoelastic functions of commercial borjón jam are more affected with temperature than

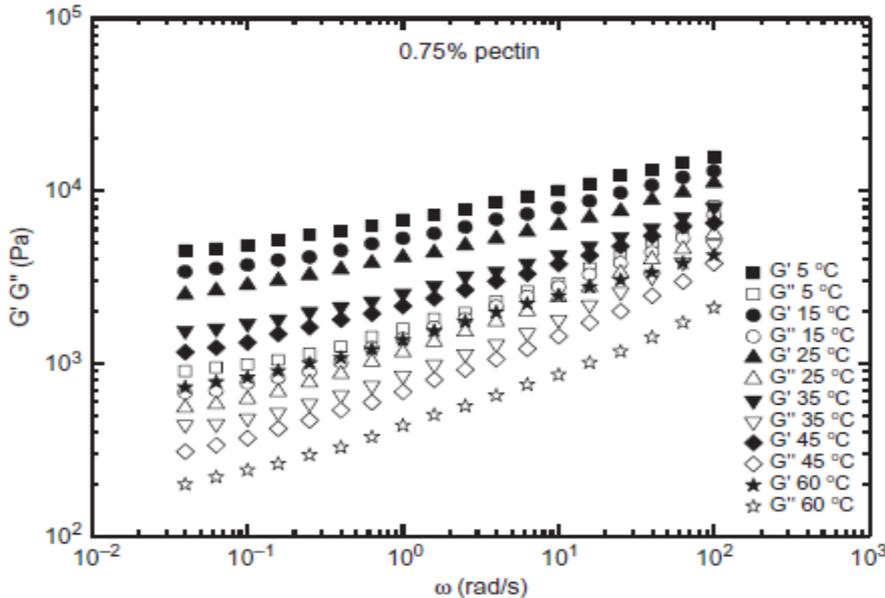


Figure 4 Frequency dependence of SAOS functions as a function of temperature for a model borjón jam containing 0.75% added pectin.

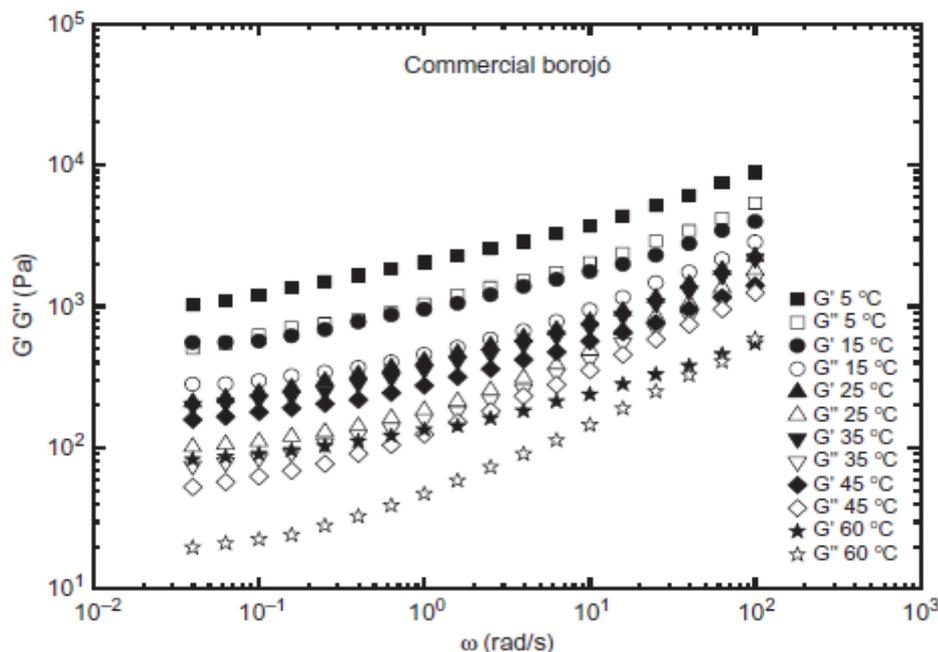


Figure 5 Frequency dependence of SAOS functions as a function of temperature for the commercial boroj6 jam formulation.

observed for the model formulation. On the contrary, a very low thermal dependence was found for the commercial peach jam. The G' value at 1 rad/s was selected to quantify the influence of temperature by using an Arrhenius-type equation:

$$G'_{[1 \text{ rad/s}]} = A_{G'} \cdot e^{\frac{E_{a,G'}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T}\right)}, \quad (1)$$

where $E_{a,G'}$ is a parameter that evaluates the thermal dependence, similar to the activation energy (J/mol), R is the gas constant (8.314 J/mol K), T is the absolute temperature (K), and $A_{G'}$ is the pre-exponential factor (Pa). Equation (1) describes well the experimental G' values, in the whole temperature range studied for most of the samples ($R^2 > 0.989$, Fig. 6). However, model formulations with the lower pectin contents (0.25 and 0.5%) deviate from the Arrhenius evolution above 45°C, exhibiting a higher thermal dependence. Table 2 collects the activation energy values for all the samples studied. As previously discussed, the commercial boroj6 jam shows significantly higher $E_{a,G}$ values than the rest of the samples analysed. The lowest $E_{a,G}$ value was obtained for the model formulation containing the lowest amount of added pectin, followed by the commercial peach jam. In general, the thermal dependence of both G' and G'' functions seems to slightly increase with pectin content. However, the loss tangent of model boroj6 jam samples slightly increased with temperature when added pectin concentration was higher than 0.75%, but, on the contrary, significantly decreased by increasing temperature, especially at low frequencies, for lower pectin concentrations (Fig. 7). This result can be explained attending to the effect of pectin concentration on biopolymer thermal-induced gelling behaviour. As Tsoga et al.^[26] discussed, during heating pectin gels a balance between the formation of hydrophobic association and

RHEOLOGY OF BOROJÓ JAM FORMULATIONS

799

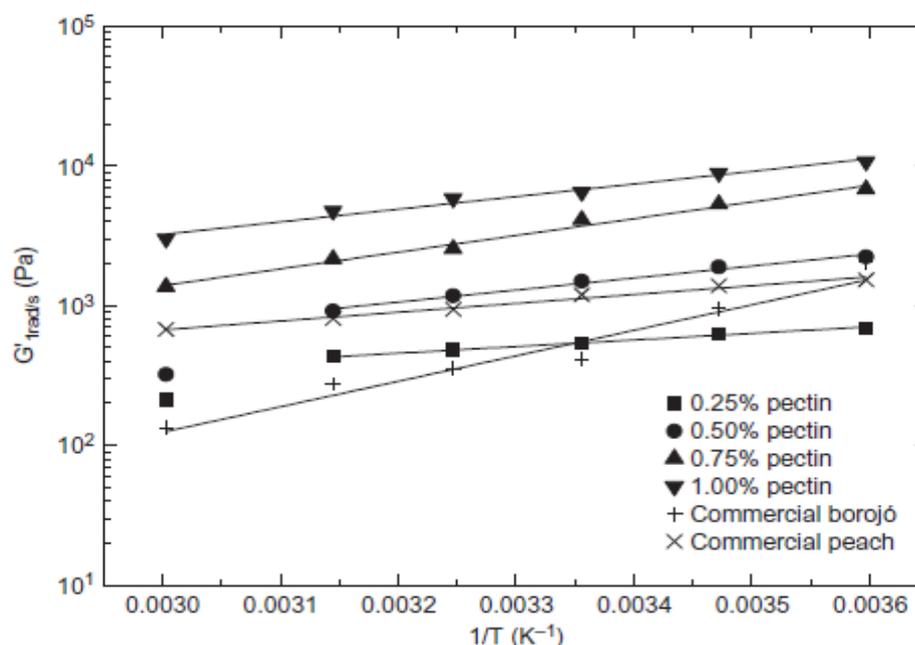


Figure 6 Variation of G' values at 1 rad/s with temperature and Arrhenius' fittings (solid lines) for the different jam formulations studied.

Table 2 Activation energy values obtained from the fittings to Eqs. (1), (3), and (4) for the different jam formulations studied.

Sample	$E_{a,G'}$ (kJ/mol)	$E_{a,\tau}$ (kJ/mol)	$E_{a,k}$ (kJ/mol)
Borjón jam (0.25% pectin)	9.04	23.37	29.08
Borjón jam (0.50% pectin)	16.45	32.26	27.88
Borjón jam (0.75% pectin)	22.94	32.73	26.87
Borjón jam (1.00% pectin)	17.14	27.86	30.27
Commercial borjón jam	35.92	18.65	24.07
Commercial peach jam	12.19	7.84	31.78

dissociation of hydrophilic junctions occurs. This balance is highly dependent on pectin concentration and pH, as described by Agoub et al.^[27] Thus, for low pectin concentrations, or pH above pK_o , the least favourable conditions to intermolecular associations, an increase in temperature yields an initial decrease in G'' down to around 80°C whereas G' remains almost constant.^[27,28] The same effect on $\tan \delta$ was observed at low frequencies for commercial borjón jam, although, in this case, this tendency was reversed at high frequencies (Fig. 7c), which indicates a change in G' and G'' frequency dependence with temperature. In this sense, in this commercial formulation, a tendency to a crossover between both SAOS functions can be clearly observed at high temperature (Fig. 2c). On the other hand, the commercial peach jam presented much lower values of the loss tangent and almost unaffected with temperature, similarly to that found in borjón jams with high pectin contents.

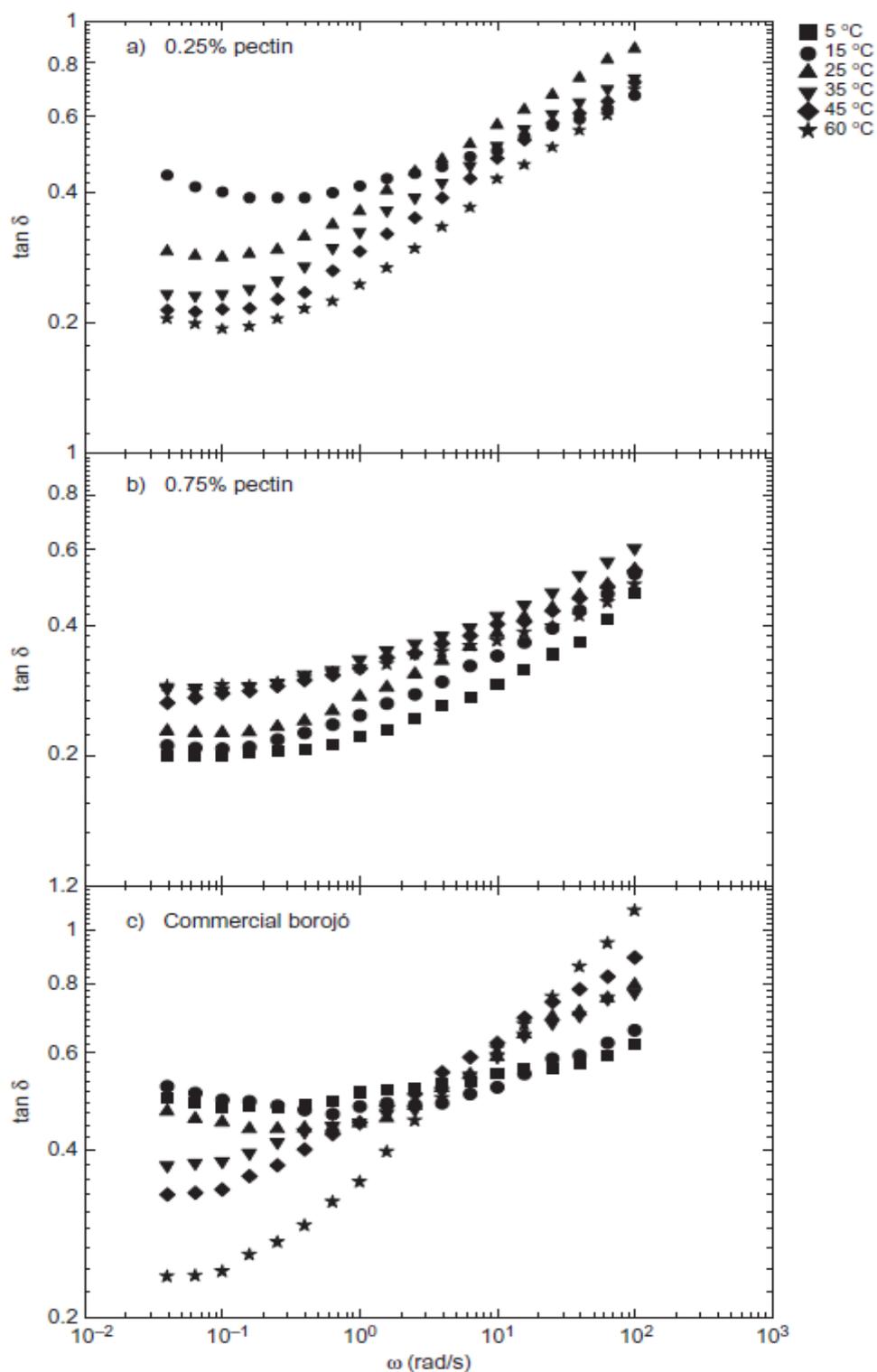


Figure 7 Evolution of the loss tangent with frequency as a function of temperature for selected borojó jam formulations.

Viscous Flow Behaviour

As previously reported,^[18,18,19] jams typically display a shear-thinning behaviour associated to a tendency to reach a yield stress value. This flow behaviour has been frequently expressed in terms of the Herschel-Bulkley model:^[29]

$$\tau = \tau_o + k \dot{\gamma}^n, \quad (2)$$

where τ is the stress, $\dot{\gamma}$ is the shear rate, τ_o is the yield stress, and k and n are consistency and flow indexes, respectively. Figure 8 shows the stress versus shear rate plots for the different borojó jam samples studied at 25°C, and fittings to the Herschel-Bulkley model ($R^2 > 0.994$). The Herschel-Bulkley parameters, as a function of temperature, are collected in Table 3. As can be observed in Fig. 8, the flow behaviour of model borojó jams is qualitatively similar to that found with the commercial borojó jam and stress values increased with pectin concentration, as expected. Moreover, stress values of commercial borojó jam were more similar to those obtained using low pectin concentrations (0.25 and 0.5% added pectin). The reference peach jam also displayed similar stress values at low and moderate shear rates but deviated from them at high shear rates as a consequence of a lower flow index (Table 3). Thus, as can be seen in Table 3, τ_o values of both commercial jam formulations are generally comprised between the values obtained for model borojó jams containing 0.25 and 0.5% added pectin. Likewise, k values are also comparable to these model jams. On the contrary, much higher τ_o values, and viscosity values in the entire shear rate range studied, were found for model borojó jams including 0.75 or 1.0% added pectin concentration.

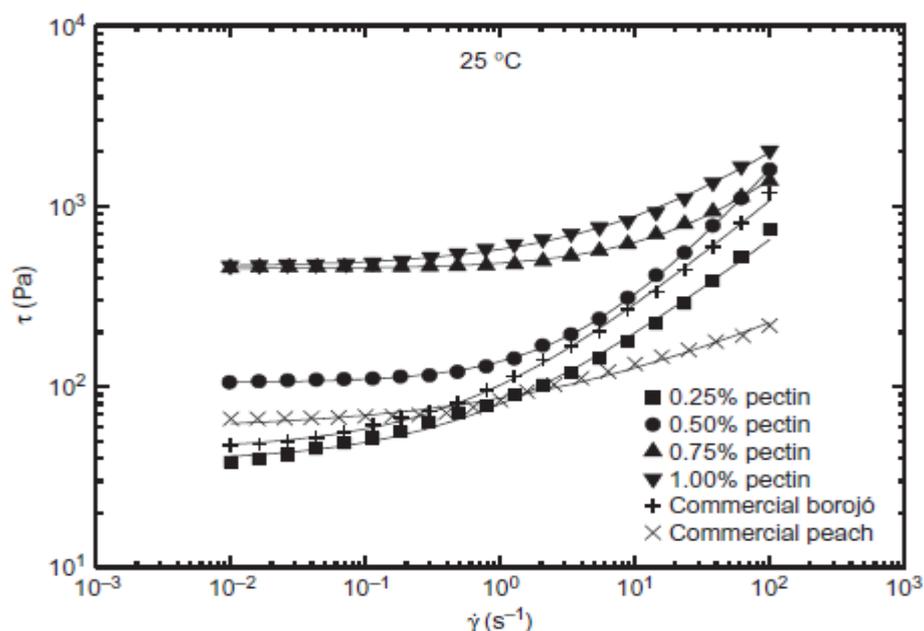


Figure 8 Viscous flow curves and Herschel-Bulkley's fittings (solid lines) for the different jam formulations studied at 25°C.

Table 3 Herschel-Bulkley parameters for the different jam formulations studied as a function of temperature.

Sample	Temperature (°C)	τ_0 (Pa)	k (Pas ⁿ)	n
Boroj3 jam (0.25% pectin)	5	114.42	61.07	0.64
	15	51.52	54.54	0.60
	25	38.20	42.10	0.58
	35	28.70	25.98	0.63
	45	25.84	14.26	0.68
	60	18.79	8.67	0.72
Boroj3 jam (0.50% pectin)	5	275.24	68.53	0.84
	15	176.82	47.56	0.82
	25	105.06	32.89	0.83
	35	69.11	20.04	0.83
	45	46.65	14.58	0.79
	60	28.34	10.01	0.76
Boroj3 jam (0.75% pectin)	5	1012.19	96.24	0.71
	15	647.86	55.64	0.67
	25	449.15	34.31	0.72
	35	299.16	32.26	0.71
	45	173.62	19.74	0.78
	60	98.43	13.16	0.75
Boroj3 jam (1.00% pectin)	5	991.90	155.58	0.61
	15	666.74	123.41	0.61
	25	459.68	116.27	0.56
	35	332.66	95.41	0.55
	45	180.11	38.75	0.65
	60	128.26	16.89	0.70
Commercial boroj3 jam	5	93.75	80.45	0.66
	15	56.54	64.06	0.65
	25	44.77	57.43	0.63
	35	37.79	50.90	0.62
	45	29.39	22.10	0.59
	60	23.23	14.74	0.63
Commercial peach jam	5	90.00	49.72	0.40
	15	58.16	35.03	0.39
	25	57.69	28.52	0.39
	35	53.53	11.37	0.60
	45	48.69	8.68	0.59
	60	47.30	6.07	0.56

Besides this, as illustrated in Fig. 9, for a selected model jam formulation apparent viscosity (or stress) values decreased with increasing temperature but, however, the shear rate dependence was not significantly modified. Hence, as can be observed in Table 3, τ_0 and k values decreased with increasing temperature but, however, n did not shown any systematic variation with temperature. Similarly, to that proposed above for G' , two Arrhenius-type relationships ($R^2 > 0.895$) were used to quantify the influence of temperature on both τ_0 and k parameters (Fig. 10):

$$\tau_0 = A_\tau \cdot e^{\frac{E_{a,\tau}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T}\right)}, \tag{3}$$

$$k = A_k \cdot e^{\frac{E_{a,k}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T}\right)}, \tag{4}$$

RHEOLOGY OF BOROJÓ JAM FORMULATIONS

803

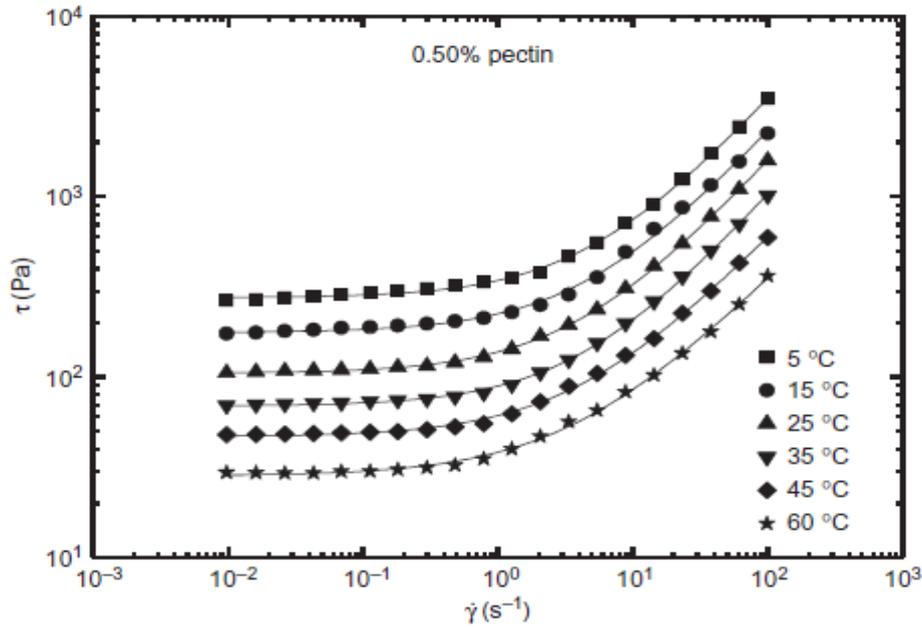


Figure 9 Viscous flow curves and Herschel-Bulkley's fittings (solid lines) as a function of temperature for a model borojó jam containing 0.50% added pectin.

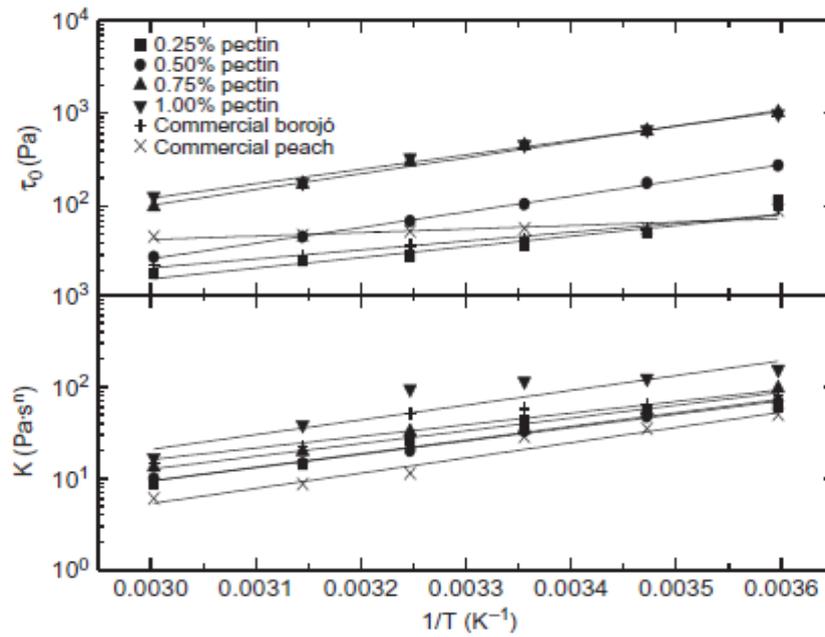


Figure 10 Variation of (a) the yield stress and (b) the consistency index with temperature, and Arrhenius' fittings (solid lines) for the different jam formulations studied.

where, in this case, $E_{a,\tau}$ and $E_{a,k}$ are the activation energies (J/mol) for the yield stress and consistency index, respectively, and A_τ and A_k are the pre-exponential parameters (Pa). The activation energy values obtained from these fittings are listed in Table 2. Similarly, to that

previously discussed for linear viscoelasticity functions, the lower $E_{a,\tau}$ value for model formulations was obtained for the sample containing the lowest amount of added pectin, comparable in this case to that found for the commercial boroj6 jam. However, not very different $E_{a,\tau}$ values were obtained for formulations with higher pectin concentration. The lowest $E_{a,\tau}$ value was displayed by the commercial peach jam, indicating a low thermal susceptibility in this parameter. Nevertheless, no important differences were obtained in $E_{a,k}$ values obtained from the fitting to Eq. (4) for all the samples studied (Table 2).

CONCLUSIONS

The rheological behaviour of boroj6 (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) jams was studied as a function of temperature (5–60°C) and added pectin content (0.25–1.0% wt.). SAOS response reveals a typical gel-like behaviour, whereas the viscous flow can be fairly well described by the Herschel-Bulkley model. In general, linear viscoelastic functions and viscosity values increased with pectin concentration and decreased with increasing temperature. Model jam formulations containing low pectin concentrations (0.25–0.5% wt.) are more similar to both boroj6 and peach commercial samples used as references. Thus, the yield stress values for both commercial jam formulations are generally comprised between the values obtained for model boroj6 jams containing 0.25 and 0.5% added pectin. However, commercial peach jam exhibited a much lower frequency dependence of both SAOS functions than boroj6 jams. Arrhenius-type relationships were used to quantify the influence of temperature on the storage modulus (G'), yield stress (τ_o), and consistency index (k). Model boroj6 jam formulations show higher temperature dependence of linear viscoelastic functions than peach jam sample but lower than boroj6 commercial jam. On the contrary, the influence of temperature on the yield stress is lower for both commercial jams, whereas the effect on the consistency index is very similar for all jam samples studied.

REFERENCES

1. Arango, A.G.J.; Quijano, T.J. Estudio de los frutos de *Borojoa patinoi* (Cuatrec.). Revista Latinoamericana de Química **1986**, *17* (3–4), 167–169.
2. Ricker, M.; Jessen, J.H.; Daly, D.C. The case for *Borojoa patinoi* (Rubiaceae) in the Choc6 region, Colombia. Economic Botany **1997**, *51*, 39–48.
3. CORPEL. Biocomercio & Ecociencia. Estudio de mercado para el Boroj6; Final report. Quito, Ecuador, 2004.
4. Mosquera, L.H.; Moraga, G.; MartÍnez-Navarrete, N. Effect of maltodextrin on the stability of freeze-dried boroj6 (*Borojoa patinoi* Cuatrec.) powder. Journal of Food Engineering **2010**, *97*, 72–78.
5. Mosquera, L.H.; Moraga, G.; FernÁndez de C6rdoba, P.; MartÍnez-Navarrete, N. Water content–water activity–glass transition temperature relationships of spray-dried boroj6as related to changes in color and mechanical properties. Food Biophysics **2011**, *6*, 397–406.
6. Pelegrine, D. H.; Silva, F.C.; Gasparetto, C.A. Rheological behaviour of pineapple and mango pulps. LWT–Food Science and Technology **2002**, *35*, 645–648.
7. Basu, S.; Shivhare, U.S.; Raghavan, G.S.V. Time dependent rheological characteristics of pineapple jam. International Journal of Food Engineering **2007**, *3*, 1.
8. Basu, S.; Shivhare, U.S. Rheological, textural, microstructural and sensory properties of mango jam. Journal of Food Engineering **2010**, *100*, 357–365.
9. Basu, S.; Shivhare, U.S.; Singh, T.V.; Beniwal, V.S. Rheological, textural and spectral characteristics of sorbitol substituted mango jam. Journal of Food Engineering **2011**, *105*, 503–512.

10. Baker, R.A.; Berry, N.; Hui, Y.H.; Barrett, D.M. Food preserves and jams. In: *Processing Fruits*, 2nd Ed.; Barrett, D.M.; Somogyi, L.; Ramaswamy, H.S.; Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL, 2005.
11. INEN. Norma Técnica Ecuatoriana 419. Conservas vegetales. Mermeladas de frutas. Requisitos. Quito, Ecuador, 1988.
12. Lal, G.; Siddappa, G.S.; Tandon, G.L. Preservation of fruits and vegetables, ICAR: New Delhi, 1998; 197.
13. Steffe, J.F. *Rheological Methods in Foods Process Engineering*, 2nd Ed.; Freeman Press: East Lansing, MI, 1996.
14. Barbosa-Canovas, G.V.; Kokini, J.L.; Ma, L.; Ibarz, A. The rheology of semiliquid foods. *Advances in Food and Nutrition Research* 1996, 39, 1–69.
15. Gallegos, C.; Franco, J.M. Rheology of food, cosmetics and pharmaceuticals. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 1999, 4, 288–293.
16. Gallegos, C.; Franco, J.M.; Partal, P. Rheology of food dispersions. In: *Rheology Reviews*; Binding, D.M.; Walter, K.; Eds.; The British Society of Rheology: Aberystwyth, UK, 2004; 19–65.
17. Tabilo-Munizaga, G.; Barbosa-Canovas, G.V. Rheology for the food industry. *Journal of FoodEngineering* 2005, 67, 147–156.
18. Carbonell, E.; Costell, E.; Durán, L. Caracterización del flujo de mermeladas comerciales españolas. *Revista Agroquímica y Tecnología Alimentaria* 1991, 31, 227–235.
19. Alvarez, E.; Cancela, M.A.; Maceiras, R. Effect of temperature on rheological properties of different jams. *International Journal of Food Properties* 2006, 9, 135–146.
20. Díaz-Ocampo, R.; García-Zapateiro, L.; Franco, J.M. Caracterización de la pulpa fresca de borjón (*Borjoia patinoi* Cuatrec.). *Ciencia y Tecnología* 2012, 5, 17–24.
21. AOAC. *Official Methods of Analysis*, 18th Ed.; Association of Official Analytical Chemists: Gaithersburg, MD, 2005.
22. Franco, J.M.; Gallegos, C.; Barnes, H.A. On slip effects in steady-state flow measurements of oil-in-water food emulsions. *Journal of Food Engineering* 1998, 36, 89–102.
23. Sánchez, M.C.; Valencia, C.; Franco, J.M.; Gallegos, C. Wall slip phenomena in oil-in-water emulsions: Effect of some structural parameters. *Journal of Colloid and Interface Science* 2001, 241, 226–232.
24. Subramanian, R.; Muthukumarappan, K.; Gunasekaran, S. Linear viscoelastic properties of regular- and reduced-fat pasteurized processed cheese during heating and cooling. *International Journal of Food Properties* 2006, 9, 377–393.
25. Gabriele, D.; De Cindio, B.; D'Antona, P. A weak gel model for foods. *Rheologica Acta* 2001, 40, 120–127.
26. Tsoga, A.; Richardson, R.K.; Morris, E.R. Role of cosolutes in gelation of high-methoxy pectin. Part 1. Comparison of sugars and polyols. *Food Hydrocolloids* 2004, 18, 907–919.
27. Agoub, A.A.; Giannouli, P.; Morris, E.R. Gelation of high methoxy pectin by acidification with D-glucono-d-lactone (GDL) at room temperature. *Carbohydrate Polymers* 2009, 75, 269–281.
28. Haghighi, M.; Rezaei, K.; Labbafi, M.; Khodaiyan, F. On the formulation design and rheological evaluations of pectin-based functional gels. *Journal of Food Science*, 2011, 76, E15–E22.
29. Herschel, W.H.; Bulkley, R. Konsistenzmessungen von gumibenzollosungen. *Kolloid-Z* 1926, 39, 291–300.