



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

**ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS BIOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE GRADUADOS E INVESTIGACIÓN EN  
ALIMENTOS**

**ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL  
TERMOPROCESO DE PURÉ DE GUAYABA (*Psidium guajava* L.) EN  
INTERCAMBIADORES DE SUPERFICIE RASPADA ANALIZANDO  
EL EFECTO SOBRE SUS COMPONENTES BIOQUÍMICOS**

**T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS  
CON ESPECIALIDAD EN ALIMENTOS  
P R E S E N T A:  
ING. ROMÁN MORALES PABLO**

**DIRECTORES:**

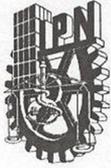
**DR. GUILLERMO OSORIO REVILLA**

**DR. RAMÓN ARANA ERRASQUÍN**



**MÉXICO, D.F.**

**MARZO, 2012**



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 12:30 horas del día 7 del mes de febrero del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de La E. N. C. B. para examinar la tesis titulada:

**“Estudio de la transferencia de calor en el termoproceso de puré de guayaba (*Psidium guajava* L.) en intercambiadores de superficie raspada analizando el efecto sobre sus componentes bioquímicos”**

**Morales**

Apellido paterno

**Pablo**

Apellido materno

**Román**

Nombre(s)

Con registro:

|   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|

Aspirante de:

Maestría en Ciencias en Alimentos

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA Directores de tesis

Dr. Guillermo Ismael Osorio Revilla

Dr. Ramón Juan Arana Errasquín

Dra. Irasema Anaya Sosa

M en C María Tera Cruz y Victoria

Dr. Mario Vizcarra Mendoza

Dra. Ma. Del Socorro López Cortez

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Manuel Jesús Piñón López



**S. E. P.**  
Escuela Nacional de  
Ciencias Biológicas  
Secretaría de Estudios  
de Posgrado e  
Investigación

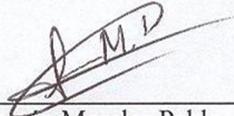


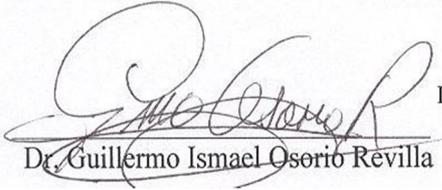
**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

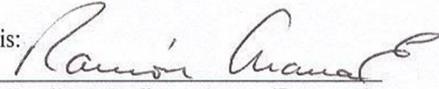
En la Ciudad de México, D.F., el día 22 del mes de febrero del año 2012, el (la) que suscribe Morales Pablo Román alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Alimentos con número de registro A100110, adscrito a la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Guillermo Ismael Osorio Revilla y cede los derechos del trabajo intitulado ESTUDIO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL TERMOPROCESO DE PURÉ DE GUAYABA (*Psidium guajava* L.) EN INTERCAMBIADORES DE SUPERFICIE RASPADA ANALIZANDO EL EFECTO SOBRE SUS COMPONENTES BIOQUÍMICOS, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: gosorio@encb.ipn.mx, si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
Román Morales Pablo  
Nombre y firma alumno (a)

  
Dr. Guillermo Ismael Osorio Revilla

Vo. Bo  
Directores de Tesis:

  
Dr. Ramón Juan Arana Erasquín

El presente trabajo se realizó bajo la dirección del Dr. Guillermo Osorio Revilla y el Dr. Ramón Arana Errasquín, en las instalaciones de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, correspondientes a las siguientes áreas del Departamento de Graduados e Investigación en Alimentos:

- Laboratorio de Ingeniería de Alimentos
- Laboratorio de Enzimología

De igual manera, se contó con el apoyo del Laboratorio de Tecnología de Alimentos del Departamento de Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, así como del Laboratorio de Química de Nutracéuticos de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro.

También durante el desarrollo de este trabajo se contó con la siguiente beca para estudio de maestría:

- Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) con número de becario 252078.

## AGRADECIMIENTOS

*Al Instituto Politécnico Nacional, al Consenso Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada durante la realización de mis estudios de maestría.*

*A mis directores de tesis el Dr. Guillermo Osorio Revilla y al Dr. Ramón Arana Errasquín por su asesoría y todo el apoyo que me brindaron para poder realizar esta investigación.*

*Al Dr. Teodoro Santiago Pineda por su comprensión, por el apoyo en la realización de las corridas experimentales y asesoría durante el presente trabajo.*

*A la Dra. Irasema Anaya Sosa y la M. en C. Ma. Teresa Cruz y Victoria por su paciencia y entusiasmo, ya que con su apoyo han hecho posible la realización de este proyecto.*

*Al Dr. Mario Vizcarra Mendoza y la Dra. Ma. Del Socorro López Cortez por sus valiosas participaciones en la revisión de este trabajo.*

*Al Dr. Eleazar Aguirre Mandujano por las facilidades brindadas para determinar la viscosidad del puré de guayaba.*

*A la Dra. Sandra O. Mendoza Díaz por el apoyo brindado en la determinación de la actividad antioxidante de muestras de puré de guayaba.*

## ÍNDICE GENERAL

|   | Pág. |
|---|------|
| Índice de cuadros.....  | v    |
| Índice de figuras.....  | vi   |
| RESUMEN.....  | viii |
| ABSTRACT.....   | ix   |
| Nomenclatura.....   | x    |
| I. INTRODUCCIÓN.....  | 1    |
| II. ANTECEDENTES.....   | 3    |
| 2.1. Procesos de transferencia de calor.....                          | 3    |
| 2.2. Intercambiador de calor de superficie raspada.....               | 3    |
| 2.3. Reología de fluidos.....   | 5    |
| 2.3.1. Fluidos newtonianos.....                                       | 5    |
| 2.3.2. Fluidos no newtonianos.....                                    | 6    |
| 2.4. Propiedades térmicas de los alimentos.....                       | 9    |
| 2.4.1. Capacidad calorífica.....                                      | 9    |
| 2.4.2. Conductividad térmica.....                                     | 9    |
| 2.5. Distribución de tiempo de residencia.....                        | 10   |
| 2.6. Investigaciones realizadas referentes al ICSR.....               | 14   |
| 2.7. Guayaba ( <i>Psidium guajava</i> L.).....                        | 17   |
| 2.8. Parámetros de calidad en el procesamiento de puré de guayaba.... | 19   |
| 2.8.1. Vitamina C.....  | 20   |
| 2.8.2. Actividad antioxidante .....                                   | 20   |
| 2.8.2.1. Ensayo ABTS.....   | 21   |
| 2.8.2.2. Ensayo FRAP.....   | 21   |
| 2.8.2.3. Polifenoles.....   | 21   |
| 2.8.3. Pectinmetilesterasa.....                                       | 22   |
| 2.8.4. Color.....   | 24   |
| III. JUSTIFICACIÓN.....   | 26   |
| IV. OBJETIVOS.....  | 28   |
| 4.1. Objetivo general.....  | 28   |
| 4.2. Objetivos específicos.....                                       | 28   |

|  |    |
|--|----|
| V. MATERIALES Y MÉTODOS.....   | 29 |
| 5.1. Materia prima.....  | 29 |
| 5.2. Equipo, instrumentos de medición, reactivos y material de laboratorio.....                                      | 29 |
| 5.3. Descripción del Intercambiador de Calor de Superficie Raspada.....  | 30 |
| 5.4. Diseño experimental.....  | 32 |
| 5.5. Métodos.....  | 33 |
| 5.5.1. Desarrollo experimental.....  | 33 |
| 5.5.2. Metodología para la realización de una corrida experimental.....  | 34 |
| 5.5.3. Determinación de pH (AOAC, 1995).....   | 34 |
| 5.5.4. Determinación de sólidos solubles (NMX-F103-1965).....  | 34 |
| 5.5.5. Determinación de acidez (AOAC, 1995).....   | 35 |
| 5.5.6. Determinación de humedad (AOAC, 1995).....  | 35 |
| 5.5.7. Determinación de densidad aparente.....   | 35 |
| 5.5.8. Determinación de la capacidad calorífica (Ecuación de Siebel, citado por Heldmand y Lund, 2007).....          | 36 |
| 5.5.9. Determinación de la conductividad térmica (Ecuación de Sweat, citado por Rao y Rizvi, 1995).....              | 36 |
| 5.5.10. Determinación de la viscosidad aparente (Reómetro Anton Paar-Physica MCR301).....                            | 36 |
| 5.5.11. Determinación experimental del coeficiente interno de transferencia de calor.....                            | 36 |
| 5.5.12. Determinación del coeficiente interno de transferencia de calor teórico (Skelland <i>et al.</i> , 1982)..... | 38 |
| 5.5.13. Evaluación de las curvas de distribución de tiempos de residencia (Quintanar, 2008).....                     | 38 |
| 5.6. Evaluación del color del producto.....  | 40 |
| 5.7. Preparación de extracto para actividad enzimática de puré de guayaba.....                                       | 41 |
| 5.7.1. Determinación de actividad de pectin-metil-esterasa (Hultin, 1948).....                                       | 41 |

|   |    |
|---|----|
| 5.8. Determinación de Vitamina C (Método de Robinson Stock, citado por Rangana, 1986).....  | 42 |
| 5.9. Evaluación de la capacidad antioxidante.....   | 43 |
| 5.9.1. Compuestos fenólicos totales y actividad antioxidante.....   | 43 |
| 5.9.1.1. Compuestos fenólicos totales.....  | 44 |
| 5.9.1.2. Capacidad antioxidante.....  | 44 |
| VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....   | 45 |
| 6.1. Caracterización de la materia prima.....   | 45 |
| 6.2. Evaluación de la viscosidad en puré de guayaba.....  | 48 |
| 6.3. Coeficientes internos de transferencia de calor experimental y teóricos.....   | 54 |
| 6.4. Evaluación de coeficientes de transferencia de calor experimental vs teórico.....  | 61 |
| 6.5. Evaluación de las Curvas de Distribución de Tiempos de Residencia.....   | 64 |
| 6.6. Determinaciones bioquímicas y actividad antioxidante del puré de guayaba.....  | 69 |
| 6.6.1. Actividad residual de la enzima pectinmetilesterasa.....   | 69 |
| 6.6.2. Evaluación del color del producto.....   | 72 |
| 6.6.3. Fenoles totales.....   | 74 |
| 6.6.4. Actividad antioxidante.....  | 77 |
| 6.7. Relación entre los parámetros bioquímicos, coeficientes de transferencia de calor y distribución de tiempos de residencia..... | 82 |
| VII. CONCLUSIONES.....  | 83 |
| VIII. RECOMENDACIONES PARA TRABAJO FUTURO.....  | 84 |
| IX. BIBLIOGRAFÍA.....   | 85 |
| X. ANEXOS.....  | 97 |

## ÍNDICE DE CUADROS

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Cuadro 1. Países productores de guayaba en % de participación.....  | 17          |
| Cuadro 2. Estados productores de guayaba en % de participación.....   | 18          |
| Cuadro 3. Composición química de guayaba por cada 100 g de pulpa.....   | 18          |
| Cuadro 4. Diseño factorial $2^3$ .....  | 32          |
| Cuadro 5. Diseño experimental.....  | 32          |
| Cuadro 6. Caracterización del puré de guayaba usado como materia prima.....                                       | 46          |
| Cuadro 7. Valores de viscosidad efectiva a 20°C y 40°C para cada velocidad de flujo que se manejó en el ICSR..... | 50          |
| Cuadro 8. Coeficientes de transferencia de calor vs teóricos.....   | 54          |
| Cuadro 9. Tratamientos evaluados para DTR durante el termoproceso de puré de guayaba.....                         | 64          |
| Cuadro 10. Condiciones de operación del puré de guayaba tratado en el ICSR.....                                   | 67          |
| Cuadro 11. Condiciones manejadas durante el procesamiento de puré de guayaba.....                                 | 69          |
| Cuadro 12. Contenido de fenoles totales en puré de guayaba.....   | 74          |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  | Pág. |
|--|------|
| Figura 1. Esquema de un intercambiador de calor de superficie raspada (Mabit <i>et al.</i> , 2008).....  | 4    |
| Figura 2. Diagrama de fluidos newtonianos y no newtonianos (Steffe, 1996).....   | 6    |
| Figura 3. Esquema de métodos de inyección más utilizados para la determinación de distribución de tiempos de residencia.....   | 11   |
| Figura 4. Estructura química de vitamina C.....  | 20   |
| Figura 5. Representación espacial del modelo CIELAB.....   | 25   |
| Figura 6. Diagrama del ICSR a nivel piloto .....   | 30   |
| Figura 7. Dimensiones del rotor del ICSR.....  | 31   |
| Figura 8. Arreglo de las placas raspadoras.....  | 31   |
| Figura 9. Diagrama de flujo del desarrollo experimental.....   | 33   |
| Figura 10. Esquema del intercambiador de calor de superficie raspada indicando las temperaturas de entrada y salida de cada fluido.....  | 37   |
| Figura 11. Área anular de transferencia de calor.....  | 38   |
| Figura 12. Inyector ideal usado para introducir 10mL de trazador en el ICSR.....   | 39   |
| Figura 13. Comportamiento pseudoplástico del puré de guayaba.....  | 49   |
| Figura 14. Viscosidad efectiva vs $8V/D$ a 20 y 40°C.....  | 51   |
| Figura 15. Curvas de fluido de proceso a 40°C (Experimental y Predicha).....   | 53   |
| Figura 16. Gráfica de Pareto ( $\alpha=0.05$ ) para la evaluación de los coeficientes de transferencia de calor experimentales en la etapa de calentamiento durante el tratamiento térmico de puré de guayaba..... | 55   |
| Figura 17. Diferencia de la temperatura durante el tratamiento térmico.....  | 56   |

|   |    |
|---|----|
| Figura 18. Gráfica de Pareto ( $\alpha=0.05$ ) para la evaluación de los coeficientes de transferencia de calor experimentales en la etapa de pre-enfriamiento durante el tratamiento térmico de puré de guayaba..... | 58 |
| Figura 19. Gráfica de Pareto ( $\alpha=0.05$ ) para la evaluación de los coeficientes de transferencia de calor experimentales en la etapa de enfriamiento durante el tratamiento térmico de puré de guayaba.....     | 59 |
| Figura 20. Porcentaje de diferencia entre los coeficientes experimentales y teóricos.....   | 61 |
| Figura 21. Porcentaje de diferencia entre los coeficientes experimentales y teórico, considerando el efecto por las placas raspadoras.....  | 63 |
| Figura 22. Curva concentración vs tiempo de los tratamientos analizados durante el tratamiento térmico de puré de guayaba.....  | 65 |
| Figura 23. Curva E de los tratamientos analizados durante el tratamiento térmico de puré de guayaba .....   | 66 |
| Figura 24. Actividad residual de la enzima PME.....   | 67 |
| Figura 25. Gráfica de Pareto ( $\alpha=0.05$ ) para la evaluación de la actividad residual de PME.....  | 71 |
| Figura 26. Valoración del color durante el tratamiento térmico de puré de guayaba.....  | 73 |
| Figura 27. Gráfica normal para las variables experimentales y la retención de fenoles totales.....  | 76 |
| Figura 28. Porcentaje de retención de la actividad antioxidante por medio de los ensayos ABTS y FRAP.....   | 78 |
| Figura 29. Gráfica de efectos principales para la retención de actividad antioxidante mediante el ensayo ABTS.....  | 80 |
| Figura 30. Gráfica de interacciones para la retención de actividad antioxidante mediante el ensayo FRAP.....  | 81 |

## RESUMEN

Se realizó el estudio de transferencia de calor, tiempos de residencia y efecto sobre las propiedades bioquímicas del producto en un intercambiador de calor de superficie raspada de tres cuerpos: calentamiento, pre-enfriamiento y enfriamiento, utilizando puré de guayaba como fluido de trabajo. Las variables experimentales fueron: flujo de alimentación, temperatura de calentamiento y velocidad de rotación de raspadores. La temperatura de entrada del fluido de pre-enfriamiento y enfriamiento se mantuvo constante a  $20\pm 1$  y  $-10\pm 0.5$  °C respectivamente en todos los experimentos. La velocidad de los raspadores fue la misma para los cuerpos de las tres etapas. Para evaluar el efecto de las variables experimentales, se utilizó un diseño factorial  $2^3$  con tres repeticiones en el punto central, considerando como variables respuesta: el coeficiente interno de transferencia de calor en cada uno de los cuerpos, porcentaje de retención de ácido ascórbico, fenoles totales, actividad antioxidante, cambio total de color y grado de inactivación de la enzima pectinmetilesterasa. Los coeficientes internos de transferencia de calor experimentales se compararon con los predichos por la ecuación de Skelland para cada condición de operación utilizada. Los resultados indicaron que los coeficientes de transferencia de calor más altos se obtienen cuando se trabaja a flujos de alimentación y velocidades de rotación de los raspadores altas (400 mL/min y 500 rpm). Al comparar los coeficientes de transferencia de calor experimentales y teóricos obtenidos con la ecuación de Skelland, se observó que estos últimos sobre-estiman los coeficientes en aproximadamente un 20% respecto a los experimentales, pero que dependen fuertemente del valor de la viscosidad que se considere en el cálculo, el cual debe incluir tanto la variación con la temperatura media del fluido de trabajo como el efecto de la rotación de los raspadores sobre la viscosidad. Los tratamientos térmicos realizados al puré de guayaba en general lograron retener aproximadamente el 80% de la vitamina C, fenoles totales y actividad antioxidante, con buena retención de color, sin embargo las únicas condiciones de operación que inactivaron en su totalidad la enzima pectinmetilesterasa, fueron aquellos en los que el puré alcanzó en promedio 90 °C al salir de la etapa de calentamiento, presentando el mayor tiempo de residencia ( $T_m = 6.24$  min), lo que ocasiono el mayor cambio de color y menor retención de los componentes bioquímicos analizados.

## ABSTRACT

Was studied heat transfer, residence times and effect on the biochemical properties of the product in a scraped surface heat exchanger of three parts: heating, pre-cooling and cooling, was used guava puree as work fluid. Experimental variables were: feed stream, heating temperature and rotational speed of scrapers. The fluid inlet temperature pre-cooling and cooling was kept constant at  $20\pm 1$  and  $-10\pm 0.5$  °C respectively in all experiments. The scrapers speed of was the same for the bodies of the three stages. To evaluate the effect of experimental variables, we used a  $2^3$  factorial design with three replications at the central point, considering as response variables: the internal coefficient of heat transfer in each of the bodies, percentage retention of ascorbic acid, phenols total antioxidant activity, total change in color and degree of inactivation of the enzyme pectin methyl esterase. Internal coefficients experimental heat transfer compared with those predicted by the equation of Skelland for each operating condition used. The indicated results that the heat transfer coefficients are obtained when higher working power to flow and rotation speed of the upper scraper (400 mL/min and 500 rpm). By comparing the heat transfer coefficients obtained with experimental and theoretical equation Skelland, it was observed that the latter over-estimate the coefficients in approximately 20% compared to the experimental but strongly depend on the viscosity value which is considered in the calculation, which must include both the average temperature variation of the working fluid as the effect of rotating scrapers on viscosity. The thermal treatments to guava puree generally managed to retain about 80% of vitamin C, total phenolics and antioxidant activity, with good color retention, however the only conditions of operation as a whole inactivated the enzyme pectin methyl esterase, were those in which the puree reached on average 90 °C to leave the heating stage, showing the highest residence time ( $T_m = 6.24$  min), which cause the greater change in color and less retention of biochemical components analyzed.

## NOMENCLATURA

|                         |  |
|-------------------------|--|
| <i>A</i>                | Área de transferencia de calor en la longitud interna del intercambiador de calor ( $m^2$ )                                      |
| <i>B</i>                | Volumen de aforo 1000 mL   |
| <i>ABTS</i>             | Codificación de actividad antioxidante medida por el ensayo ABTS para el polinomio de respuesta                                  |
| <i>c</i>                | Concentración del trazador a la salida   |
| <i>C</i>                | Volumen de solución 5 mL   |
| <i>C<sub>p</sub></i>    | Calor específico ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ )   |
| <i>D</i>                | Diámetro interno del cilindro (m)  |
| <i>D<sub>s</sub></i>    | Diámetro del eje giratorio (m)   |
| <i>E</i>                | Distribución a la edad de la salida (min)  |
| <i>E</i>                | mL de extracto en cada mL del volumen total de reacción  |
| <i>E<sub>1</sub></i>    | Volumen del extracto utilizado, 2 mL   |
| <i>E<sub>0</sub></i>    | Energía de activación ( $\text{KJ mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ )   |
| <i>FRAP</i>             | Codificación de actividad antioxidante medida por el ensayo FRAP para el polinomio de respuesta                                  |
| <i>f</i>                | Caudal del flujo ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )  |
| <i>FT</i>               | Codificación de fenoles totales para el polinomio de respuesta   |
| <i>G</i>                | Gasto volumétrico ( $\text{m}^3\cdot\text{s}$ )  |
| <i>G<sub>NaOH</sub></i> | Gasto de NaOH (mL)   |
| <i>h</i>                | Coefficiente interno de transferencia de calor experimental ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{°C}$ )                                  |
| <i>h<sub>e1</sub></i>   | Coefficiente interno de transferencia de calor experimental para la etapa de calentamiento ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{°C}$ )   |
| <i>h<sub>e2</sub></i>   | Coefficiente interno de transferencia de calor experimental para la etapa de preenfriamiento ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{°C}$ ) |
| <i>h<sub>e3</sub></i>   | Coefficiente interno de transferencia de calor experimental para la etapa de preenfriamiento ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{°C}$ ) |
| <i>K</i>                | Conductividad térmica ( $\text{W}/\text{m} \text{°C}$ )  |
| <i>m</i>                | Masa de la muestra (g)   |
| <i>m</i>                | Flujo de masa ( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )  |
| <i>mM</i>               | Micromolar   |
| <i>N</i>                | Velocidad del agitador ( $\text{rev}\cdot\text{s}^{-1}$ )  |
| <i>N<sub>NaOH</sub></i> | Normalidad del NaOH para la determinación de PME (0.01N)   |
| <i>n<sub>B</sub></i>    | Número de raspadores en el agitador (2)  |
| <i>PE</i>               | Codificación de pectinmetilesterasa para el polinomio de respuesta   |
| <i>Q</i>                | Calor cedido al producto a su paso por el intercambiador de calor ( $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$ )                               |
| <i>q</i>                | Área bajo la curva concentración-tiempo  |
| <i>rpm</i>              | Velocidad de rotación al eje de raspado (revoluciones por minuto)  |

|                           |  |
|---------------------------|--|
| $R$                       | Constante de los gases ideales ( $8.3143 \text{ KJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ )                           |
| $R^2$                     | Coefficiente de determinación  |
| $t$                       | Tiempo de reacción (5 minutos)   |
| $t_1$ y $t_2$             | Temperatura del medio refrigerante a la entrada y salida respectivamente ( $^{\circ}\text{C}$ )          |
| $T_1$ y $T_2$             | Temperatura del puré de guayaba a la entrada y salida del intercambiador de calor ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
| $T_1$ y $T_2$             | Temperatura a la que se determinó la viscosidad (20 y $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , respectivamente)   |
| $t_w$                     | Temperatura media de la pared interna del cuerpo del ICSR ( $^{\circ}\text{C}$ )                         |
| $t_m$                     | Temperatura media logarítmica del producto en el ICSR ( $^{\circ}\text{C}$ )                             |
| $T_m$ y $TPR$             | Tiempo medio y Tiempo promedio de residencia teórico (min)   |
| $UPME$                    | miliMoles de sustrato transformado en cada gramo de pulpa por minuto                                     |
| $V$                       | Velocidad axial del flujo del líquido ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )                                   |
| $v$                       | Volumen del recipiente ( $\text{m}^3$ )  |
| $X_w$                     | Fracción de agua en base húmeda (%)  |
| $dv/dy$                   | Velocidad de deformación ( $\text{s}^{-1}$ )   |
| $\beta$                   | Constante experimental para fluidos no newtonianos (0.96)  |
| $\alpha$                  | Coefficiente experimental para fluidos no newtonianos (0.014)  |
| $\tau$                    | Esfuerzo de corte ( $\text{N}/\text{m}^2$ )  |
| $\mu$ , $\mu_a$ y $\mu_e$ | Viscosidad, Viscosidad aparente y Viscosidad efectiva ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ )                  |
| $\mu_1$ y $\mu_2$         | Viscosidad efectiva ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ )  |
| $\mu L$                   | Microlitros  |
| $\rho$                    | Densidad del fluido ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )  |
| $\Delta E$                | Cambio total de color  |
| $\sigma^2$                | Varianza (Amplitud de la distribución)   |
| $k$ y $k'$                | Índice de consistencia para fluidos no newtonianos ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ )                     |
| $n$ y $n'$                | Índice comportamiento para fluidos newtonianos (adimensional)  |

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente la transferencia de calor sigue siendo un campo de gran interés en investigaciones científicas y de ingeniería en alimentos, así como en procesos de diseño, construcción y evaluación de equipos empleados en tratamientos térmicos (Goldstein *et al.*, 2005). La finalidad de los tratamientos térmicos en la industria de los alimentos es para preservarlos. Entre los equipos más utilizados para llevar a cabo estos tratamientos se tienen a los intercambiadores de calor de placas, de coraza o tubo. Sin embargo, cuando se trabaja con fluidos muy viscosos como es el caso de jugos concentrados, mermeladas y purés, no es práctico tratarlos en estos equipos. Más aún, si son productos sensibles al calor y son calentados en tales equipos, por ejemplo para ser pasteurizados, se puede deteriorar el producto en contacto con la superficie calentada, ocasionando cambios considerables en las propiedades bioquímicas del alimento.

Una de las alternativas para evitar o disminuir estos problemas es utilizando un intercambiador de calor de superficie raspada.

Los intercambiadores de calor de superficie raspada (ICSR) son con frecuencia utilizados en la industria química y alimentaria para el calentamiento o enfriamiento de productos de alta viscosidad. La principal ventaja de estos equipos es que evitan la acumulación de partículas en la superficie de intercambio de calor por medio de raspados periódicos mediante unas placas raspadoras (Mabit *et al.*, 2004).

Uno de los problemas en las operaciones unitarias en la industria de los alimentos ha sido la eficiencia en el calentamiento o enfriamiento de los fluidos alimentarios. Una forma de evaluar esta eficiencia ha sido mediante la determinación de los coeficientes de transferencia de calor. Entre las opciones para determinar este parámetro se han establecido dos metodologías; una de forma experimental, utilizando las temperaturas generadas por el equipo y la otra es de manera teórica. De acuerdo a los estudios de transferencia de calor en estos equipos (Boccardi *et al.*, 2010; D'Addio *et al.*, 2011; Saraceno *et al.*, 2011) se ha realizado la determinación de los coeficientes de transferencia de calor de forma teórica mediante la ecuación de Skelland, considerándola como

una de las más completas en el área de ingeniería de alimentos, debido a que incluye tanto las propiedades térmicas y reológicas del alimento, como las características geométricas del equipo. Sin embargo, otros estudios (Flores, 2005; Llano, 2007; Quintanar, 2008; Pascual, 2011), al determinar ambos coeficientes y realizar la comparación reportan diferencias muy altas atribuyendo que el parámetro que influyó a estas diferencias fue la viscosidad del fluido. Además en la mayoría de estos estudios han considerado el proceso de calentamiento o de enfriamiento de manera independiente.

Por lo tanto, surge la necesidad de realizar la caracterización de este equipo estudiando las tres etapas que lo conforman (calentamiento, preenfriamiento y enfriamiento) de manera conjunta, debido a que en la industria química, biológica y de procesamiento de alimentos consideran el proceso de forma global. En este trabajo se incluye una corrección por temperatura en el parámetro de la viscosidad con la finalidad de disminuir las diferencias encontradas en trabajos previos. En la realización de este estudio se utilizó como fluido de trabajo puré de guayaba considerado un fruto de gran producción en México y que contiene niveles significativos de componentes biológicamente activos que son benéficos para la salud (Marquina *et al.*, 2008; Restrepo *et al.*, 2009; Contreras *et al.*, 2011; Rojas y Narváez, 2009), los cuales fueron utilizados como indicadores de termodegradación durante el proceso.

## II. ANTECEDENTES

### 2.1. Procesos de transferencia de calor.

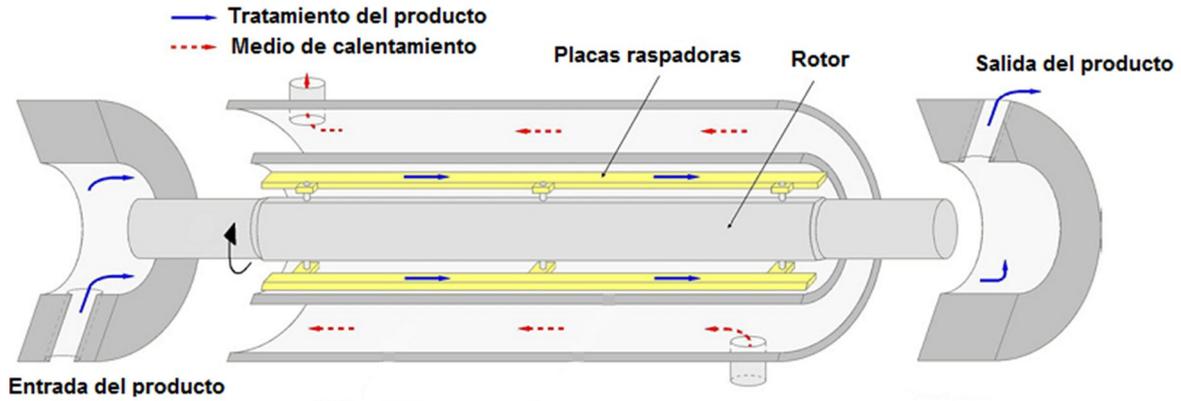
La transferencia de calor en productos fluidos se usa frecuentemente en la industria de los alimentos para preservarlos. Cuando estos productos son muy viscosos como es el caso de los purés, no es práctico tratarlos en intercambiadores de calor de placas, de coraza o tubo, en virtud de su carácter viscoso. Más aún, si son productos sensibles al calor, si son calentados en tales equipos, por ejemplo para ser pasteurizados, se puede deteriorar el producto en contacto con la superficie calentada (Van Boxtel y De Fiellietaz, 1983).

Se ha descrito a la transferencia de calor como el estudio de las velocidades a las cuales el calor se intercambia entre los fluidos. Puesto que la transferencia de calor considera un intercambio en un sistema, la pérdida de calor de uno de los fluidos deberá ser igual al calor absorbido por el otro dentro de los confines del mismo sistema (Kern, 2001). Entre los equipos más utilizados en la industria de los alimentos para llevar a cabo tratamiento térmico se encuentran los intercambiadores de calor de superficie raspada.

### 2.2. Intercambiador de calor de superficie raspada.

Los intercambiadores de calor de superficie raspada (ICSR) son con frecuencia utilizados en la industria química y alimentaria para el calentamiento o enfriamiento de productos de alta viscosidad (Mabit *et al.*, 2003). La principal ventaja es evitar la acumulación de partículas en la superficie de intercambio de calor por medio de raspados periódicos de la superficie de calentamiento mediante placas raspadoras (Mabit *et al.*, 2004).

Este equipo consta de un intercambiador de doble tubo externo enchaquetado que contiene el vapor de agua o el líquido de calentamiento ó enfriamiento y un eje interno al cual se acoplan láminas raspadoras, como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1. Esquema de un intercambiador de calor de superficie raspada (Mabit *et al.*, 2008).**

El producto líquido viscoso fluye a velocidad baja por el tubo central entre el eje giratorio y la pared del tubo interno. Las placas raspadoras al girar desprenden continuamente las acumulaciones superficiales, evitando así sobrecalentamientos localizados y permitiendo una transferencia de calor más rápida y uniforme. Algunos factores que determinan el patrón de flujo son: diferencias de temperaturas radiales, longitud del equipo, tiempo de residencia, tipo de fluido (newtoniano o no newtoniano); estos elementos en conjunto determinan el movimiento del fluido de proceso en el espacio anular (Harrod, 1986; Lakhdar *et al.*, 2005). Skelland *et al.* (1962) propusieron la Ecuación 1, para predecir el coeficiente interno de transferencia de calor teórico para el intercambiador de superficie raspada: basado en el análisis dimensional (Van Boxtel y De Fielliettaz, 1983):

$$\frac{hD}{K} = \alpha \left( \frac{C_p \mu}{K} \right)^\beta \left( \frac{D - D_s V \rho}{\mu} \right)^{1.0} \left( \frac{DN}{V} \right)^{0.62} \left( \frac{D_s}{D} \right)^{0.55} (n_B)^{0.53} \quad (1)$$

Donde las variables de la Ec. (1) se encuentran definidas en nomenclatura. Esta ecuación cubre un intervalo de velocidades de flujo axial de 0.076 a 0.038 m/min y velocidades de rotación entre 100 y 750 rpm. Es importante destacar que la ecuación anterior se evaluó con fluidos con comportamiento newtoniano, utilizando mezclas de agua-glicerol (Van Boxtel y De Fielliettaz, 1983).

De igual manera, en el área de ingeniería de alimentos la Ecuación 1, es considerada como una de las más completas, debido a que relaciona dos números adimensionales que son el número de Prandtl (Pr) y Reynolds (Re), además de incluir características que describen la transferencia de calor en función de la geometría del intercambiador de calor de superficie raspada (Boccardi *et al.*, 2010). Por lo tanto, en esta investigación se pretende evaluar los coeficientes de transferencia de calor experimental y comparar con los obtenidos mediante la ecuación de Skelland, para así establecer la aplicabilidad de esta ecuación para productos alimenticios no newtonianos.

Para utilizar la ecuación de Skelland, es necesario conocer las características de los fluidos comúnmente utilizados dentro de la industria de los alimentos, además de sus respectivas propiedades reológicas y térmicas (capacidad calorífica y conductividad térmica).

### **2.3. Reología de fluidos.**

#### **2.3.1. Fluidos newtonianos.**

En el mundo real existen una amplia variedad de fluidos tan comunes como los newtonianos que siguen la simple relación dada por la ley de la viscosidad de Newton que se indica en la Ecuación 2.

$$\tau = -\mu (dv/dy) \quad (2)$$

Donde las variables de la Ec. (2) están definidas en la nomenclatura. La característica de estos fluidos es que el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la velocidad de deformación (Levenspiel, 1997).

### 2.3.2. Fluidos no newtonianos.

En estos no hay proporcionalidad entre la relación de deformación y el esfuerzo de corte (Ecuación 3); por lo que su viscosidad aparente no permanece constante aun cuando la temperatura y la composición permanecen invariables, sino que depende del esfuerzo de corte o de la velocidad de deformación (Ibarz y Barbosa-Cánovas, 1999).

$$\mu_a = \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} \quad (3)$$

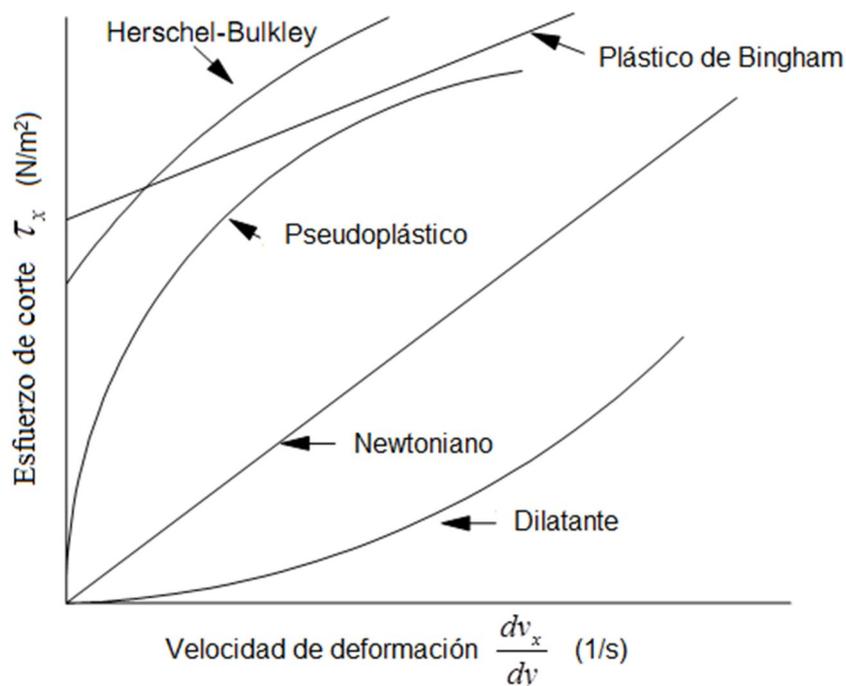
Dónde:

$\mu_a$ : Viscosidad aparente, Pa·s

$\tau$ : Esfuerzo de corte, N/m<sup>2</sup>

$dv/dy$ : Velocidad de deformación, 1/s

Así, la clasificación de los fluidos alimentarios según su comportamiento reológico puede establecerse de la siguiente forma (Figura 2).



**Figura 2. Diagrama de fluidos newtonianos y no-newtonianos (Steffe, 1996).**

La gran mayoría de los fluidos no-newtonianos que tienen aplicaciones en problemas de ingeniería en alimentos caen dentro de esta categoría y pertenecen a fluidos pseudoplásticos. Uno de los modelos más utilizados para describir este tipo de comportamiento es el de la ley de potencia o de Ostwald de Waele que se muestra en la Ecuación 4 (Carcamo, 2005).

$$\tau = k \left( - \frac{dv}{dy} \right)^n \quad (4)$$

Donde las variables para la Ec. (4) están definidas en la nomenclatura. Para los fluidos pseudoplásticos  $n$  es menor a 1 y la viscosidad aparente disminuye al aumentar el esfuerzo de corte. Para determinar el flujo de fluidos no newtonianos en ductos circulares, que es el caso que se presenta en el ICSR, esta ecuación se convierte en la Ecuación 5.

$$\tau = k' \left( \frac{8V}{D_{eq}} \right)^{n'} \quad (5)$$

Donde  $k'$  y  $n'$  tienen significados semejantes a los de la Ecuación 4. Se puede demostrar que la relación que existe entre  $k'$  y  $n'$  con  $k$  y  $n$  está dada por las Ecuaciones 6 y 7 (Skelland *et al.*, 1962).

$$k' = k \left( \frac{3 n'}{4 n'} \right)^{n'} \quad (6)$$

$$n = \frac{n'}{1 - \frac{1}{3n'+1} \left( \frac{dn'}{d(\log \tau)} \right)} \quad (7)$$

La derivada de  $dn'/d(\log T)$  dentro del intervalo de validez de la ley de la potencia (Ec.4) es igual a cero y por lo tanto  $n = n'$ . Entonces, conociendo  $k'$  y  $n'$  a cualquier velocidad de flujo ( $V$ ) se podrá conocer la viscosidad efectiva ( $\mu_{efec}$ ) en el ducto realizando los cálculos con la Ecuación 8.

$$\mu_{efec} = k \left( \frac{3n' + 1}{4n'} \right) \left( \frac{8V}{D_{eq}} \right)^{n-1} \quad (8)$$

La Ecuación 8, se utiliza para conocer la viscosidad efectiva en tubos circulares (Claude, 2004). No obstante, diversos estudios (Pelegrine *et al.*, 2004; Nindo *et al.*, 2007; Maceiras *et al.*, 2007; Ibarz y Manayay, 2010) al evaluar el comportamiento reológico en jugos concentrados y purés durante el tratamiento térmico, concluyen que para describir la expresión del efecto de la temperatura en el comportamiento reológico del flujo de estos fluidos alimentarios, puede utilizarse una relación tipo Arrhenius (Ecuación 9) como satisfactoria para determinar la variación de la viscosidad ( $\mu$ ) con la temperatura:

$$\mu = K_0 \cdot e^{\frac{E_0}{RT}} \quad (9)$$

Donde:

$E_0$ : Energía de activación del fluido

$R$ : Constante de los gases

$T$ : Temperatura absoluta en K

$K_0$ : Constante.

Al respecto, la energía de activación ( $E_0$ ) dentro del área de la reología de alimentos se puede definir como la mínima cantidad de energía para lograr un cambio, es decir, relaciona la dependencia de la viscosidad respecto a la temperatura. Por lo tanto, considerando la ecuación anterior se podrá determinar la viscosidad efectiva ( $\mu_{efec}$ ) a cada una de las temperaturas alcanzadas al efectuar un tratamiento térmico en el ICSR.

---

---

## 2.4. Propiedades térmicas de los alimentos.

### 2.4.1. Capacidad calorífica.

La capacidad calorífica de una sustancia se define como la cantidad de calor necesaria para aumentar su temperatura en un grado (Geankoplis, 1999).

Uno de los primeros modelos propuestos para calcular la capacidad calorífica ( $C_p$ ) de los alimentos es la propuesta por (Siebel, 1982) Ecuación 10:

$$C_p = (0.837 + 3.349 X_w) (1000) \quad (10)$$

Esta ecuación es usada para la determinación del  $C_p$  en frutas y hortalizas, alimentos con alto contenido de agua, sus unidades son kJ/kg·°C y la fracción de agua ( $X_w$ ) es en base húmeda (Rao y Rizvi, 1995).

### 2.4.2. Conductividad térmica.

La conductividad térmica es la velocidad de transferencia de calor en un área transversal conocida; influenciado por un gradiente de temperatura. Existen diversos modelados matemáticos que se utilizan para calcular la conductividad térmica de los alimentos (Heldman y Lund, 2007). Para frutas y vegetales con contenido de agua superior al 69%, Sweat (1974) propone la Ecuación 11 (citado por Rao y Rizvi, 1995).

$$K = 0.148 + 0.493 X_w \quad (11)$$

Por lo tanto la conductividad térmica ( $K$ ) de frutas puede ser calculada mediante la ecuación anterior, debido a su alto contenido de humedad. Las unidades de este parámetro son W/m·°C y la fracción ( $X_w$ ) también es en base húmeda.

No obstante, durante el procesamiento de los alimentos un parámetro importante a evaluar es el tiempo promedio que permanecen las moléculas del fluido en el intercambiador.

El cálculo de las curvas de tiempos de residencia permite conocer el tiempo medio que el material está sometido al tratamiento térmico y con ello conocer el efecto sobre la calidad del producto.

En este trabajo se determinó la distribución de tiempos de residencia en el ICSR empleando un fluido con comportamiento no newtoniano (puré de guayaba), evaluando este parámetro mediante la metodología estímulo-respuesta, utilizando como trazador una mezcla formada por una cantidad de muestra (puré de guayaba) a la cual se le adiciona una solución concentrada de NaCl como trazador.

## **2.5. Distribución de tiempos de residencia.**

Se debe entender distribución de tiempos de residencia de la corriente del fluido o distribución de la edad a la salida ( $E$ ), como el tiempo que permanece cada una de las moléculas en el recipiente (edad del elemento). Éste es uno de los parámetros más importantes que afectan la transferencia de calor y por lo tanto la eficiencia del procesamiento térmico de alimentos fluidos con o sin partículas. Así mismo, la presencia de partículas en el fluido complica significativamente las condiciones del flujo que tienen influencia en la distribución de los tiempos de residencia (Lee y Singh, 1991).

En el caso del flujo no ideal se considera solamente el flujo estacionario de un solo fluido a través de un reactor, sin reacción química y sin cambios de densidad (Levenspiel, 1997). La distribución de tiempos de residencia puede determinarse de manera fácil y directa por un método de investigación empleado ampliamente, que es el método experimental estímulo-respuesta, en donde el análisis de la respuesta da información sobre el sistema (Levenspiel, 1997).

El término edad de un elemento en la corriente de salida (distribución de la edad de salida ( $E$ )) se refiere al tiempo que dicho elemento permaneció en el recipiente, y matemáticamente se escribe como:

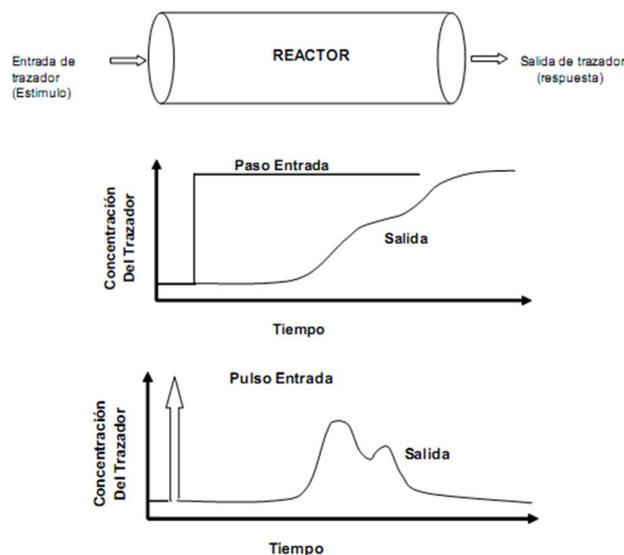
$$\int_0^{\infty} E dt = 1 \quad (12)$$

La Curva  $E$ , se representa comúnmente como una curva normalizada, es decir, de modo que el área bajo la curva sea la unidad, donde  $E dt$  es la fracción de salida cuya edad está comprendida entre  $t$  y  $(t+dt)$ .

El estímulo es una inyección del trazador en el fluido que entra al recipiente, mientras que la respuesta representa la concentración del trazador a la salida del recipiente frente al tiempo. Puede utilizarse como trazador cualquier sustancia que se pueda detectar y que no perturbe el tipo de flujo en el recipiente (Levenspiel, 1997).

El trazador a seleccionar además de ser una especie no reactiva, debe tener propiedades físicas similares a las de la mezcla de reacción, debe ser totalmente soluble en la mezcla y no debe adsorberse en las paredes ni en otras superficies del reactor.

Los materiales coloridos y radiactivos son los dos tipos de trazador más comunes. Los métodos de inyección más utilizados son el de entrada por pulso y el de entrada por escalón (Figura 3).



**Figura 3. Esquema de métodos de inyección más utilizados para la determinación de distribución de tiempos de residencia.**

En la práctica se prefiere utilizar la técnica de pulso por su sencillez y facilidad de aplicación debido a que no se requiere mantener constante la concentración del trazador en la alimentación como es el caso de entrada por escalón.

En una entrada por pulso, cierta cantidad de trazador se inyecta repentinamente y en una sola ocasión en la corriente de alimentación que ingresa en el reactor, tardando lo menos posible en hacerlo (Fogler, 1986).

A la respuesta normalizada del trazador en la corriente de salida frente al tiempo se le conoce como Curva C.

Para efectuar esta normalización se divide la concentración  $c$  del trazador a la salida, por el área bajo la curva concentración–tiempo ( $q$ ), por tanto (Levenspiel, 1997):

$$\int_0^{\infty} \frac{c}{q} dt = 1 \qquad q = \int_0^{\infty} c dt \qquad (13)$$

Para el caso de un recipiente cerrado (en el que el fluido entra y sale solamente por flujo en pistón, es decir, que tiene perfil plano de velocidad), en flujo estacionario, la Curva C representa la distribución de tiempos de residencia (DTR) de cualquier porción del fluido de entrada y ha de ser la misma que la DTR del fluido de salida, por lo que en este caso,  $C = E$  (edad a la salida), por lo que la Curva C da directamente la distribución de edades a la salida (Levenspiel, 1997). Considerando estado estacionario y densidad constante, entonces el tiempo promedio de residencia ( $TPR$ ) es igual a la relación entre el volumen del recipiente ( $v$ ) y el caudal o flujo ( $f$ ) que en forma matemática es (Levenspiel, 1997):

$$T_m = TPR \qquad TPR = \frac{v}{f} \int_0^{\infty} t E dt \qquad (14)$$

Cuando se tiene un recipiente abierto la Curva C puede ser muy diferente a la Curva E, y los TPR de estas curvas no son iguales. En este caso es importante caracterizar la distribución de los tiempos de residencia mediante la media y la varianza de la Curva E (Levenspiel, 1997). Para la curva de concentración contra  $t$ , el tiempo medio de residencia ( $T_m$ ) está dado por:

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} t c dt}{\int_0^{\infty} c dt} = \frac{(\frac{t_0 c_0}{2} + c_1 + c_2 + \dots + c_{n-1} + \frac{t_n c_n}{2})}{(\frac{c_0}{2} + c_1 + c_2 + \dots + c_{n-1} + \frac{c_n}{2})} \quad (15)$$

Dónde:

$c$  = concentración del trazador a la salida.

$t$  = tiempo.

La amplitud de la distribución se mide por la varianza ( $\sigma^2$ ), definida como (Levenspiel, 1997):

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t-t_m)^2 c dt}{\int_0^{\infty} c dt} = \frac{\int_0^{\infty} t^2 c dt}{\int_0^{\infty} c dt} - t_m^2 \quad (16)$$

La varianza representa el cuadrado de la amplitud de la distribución y sus dimensiones son (tiempo)<sup>2</sup>, y permite comparar curvas experimentales con alguna de una familia de curvas teóricas (Levenspiel, 1997).

En 1988 Abichandani y Samarma, estudiaron la distribución de tiempos de residencia (DTR) en un ICSR de tipo horizontal utilizando agua como fluido de trabajo y como trazador una solución saturada de cloruro de sodio (NaCl). El trazador fue inyectado a la corriente de entrada del ICSR también por la técnica de pulso y midieron la conductividad eléctrica de las muestras en el efluente en función del tiempo. Encontrando que al incrementar la velocidad de rotación y flujo de alimentación se obtienen tiempos de residencia menores.

Flores (2005) determinó las curvas de distribución de tiempos de residencia (DTR) y tiempo medio de residencia ( $T_m$ ) en puré de zanahoria en un ICSR, e indicó que la DTR promedio determinados en los tratamientos del puré de zanahoria son función del flujo de alimentación e independiente de la velocidad de rotación de raspadores.

De igual manera Llano (2007), en su estudio procesamiento de mezclas de puré de zanahoria papaya y su efecto sobre componentes bioquímicos y sensoriales, determinó las curvas de distribución de tiempos de residencia de la

mezcla con mejores características post-tratamiento en un ICSR, encontrando que la DTR para la mezcla de 60% de zanahoria y 40% papaya permitió determinar que cuando la velocidad de los raspadores aumenta de 100 rpm a 200 rpm, la dispersión de las partículas del producto dentro del ICSR es ligeramente menor (tiende a flujo tapón).

Por otro lado, es fundamental mencionar algunas investigaciones realizadas en el ICSR, a fin de conocer el estado del arte respecto a este equipo.

## **2.6. Investigaciones realizadas referentes al ICSR.**

Diversos estudios se han hecho en el ICSR para dar una mejor comprensión de los fenómenos que ocurren en la geometría de éste. Se ha evaluado la transferencia de calor, consumo de energía y distribución del tiempo de residencia. La presencia de paletas raspadoras acopladas al rotor mejora la transferencia de calor (Abichandani y Sarma, 1987; Härröd, 1986; Naimi, 1989).

Härröd, 1986, evaluó el efecto del mezclado en un ICSR, reportando una revisión bibliográfica sobre los efectos que tiene el acoplamiento de unidades de raspado en el mezclado, distribución de tiempo de residencia y transferencia de calor.

Abichandani y Sarma (1987), estudiaron la hidrodinámica y transferencia de calor en una película delgada dentro de un ICSR. Aportando una revisión de literatura referente del comportamiento de la transferencia de calor en ductos circulares.

Lakhdar *et al.*, (2005), en su estudio de transferencia de calor en un ICSR enfriando una mezcla de agua-etanol, reportan que cuando la separación de las aspas-pared es mayor a 1 mm se forma una capa de hielo la cual impide que el efecto de raspado sea el óptimo.

De acuerdo a las investigaciones anteriormente citadas sobre este equipo, los autores evaluaron la transferencia de calor empleando fluidos con comportamiento newtoniano.

Por lo que es importante destacar algunos estudios en este equipo utilizando fluidos con comportamiento no newtoniano, debido a que en la industria de los alimentos la mayor parte de los fluidos alimentarios caen dentro de este grupo.

Al respecto, Lee y Singh (1991) evaluaron la distribución de tiempos de residencia utilizando una mezcla de cubos de papa con una solución de carboximetilcelulosa, donde reportan que la distribución de tiempos de residencia tiene un efecto significativo sobre la concentración de las partículas presentes en la solución.

Flores (2005) trabajó con el procesamiento de puré de zanahoria y el efecto sobre sus carotenoides. Encontró que el mejor tratamiento térmico se hizo con el medio de calentamiento a 145°C, velocidad de rotación de raspadores de 100 rpm y un flujo de alimentación de 240 mL/min. Por otro lado Llano (2007) evaluó el termoproceso de mezclas de purés de zanahoria papaya y su efecto sobre sus componentes bioquímicos y sensoriales. Reporta que los parámetros bioquímicos se conservan mejor con un flujo de 250 mL/min, temperatura de calentamiento de 145°C y rotación de 100 rpm y una mezcla de 40 y 60 % de zanahoria y papaya respectivamente. Al comparar los coeficientes de transferencia de calor, indica que las diferencias en los coeficientes experimentales y teóricos evaluados con la Ecuación de Skelland se deben al efecto de la temperatura sobre la viscosidad, la cual no fue corregida.

De igual manera Quintanar (2008) determinó la caracterización y capacidad de enfriamiento en un ICSR utilizando puré de papaya. Encontró que existe diferencia entre los coeficientes teóricos y experimentales debido a los parámetros que se emplearon para los cálculos, es decir, estas diferencias se debieron a la viscosidad y propiedades térmicas empleadas en la Ecuación de Skelland.

Recientemente Pascual (2011) evaluó el termoprocesamiento de un puré de mango en un intercambiador de calor de superficie raspada y el efecto sobre sus componentes bioquímicos. Reporta que los mejores valores del coeficiente interno de transferencia de calor experimental estuvieron determinados en primer lugar por la velocidad de rotación alto (300 rpm) y en segundo lugar con doble fila de unidades de raspado. Además los tratamientos en general

---

---

ocasionaron el 15% de pérdida de carotenos, 25 % de ácido ascórbico y los únicos tratamientos que inactivaron totalmente la actividad de la enzima pectinmetilesterasa fueron aquellos en los que el puré alcanzo 90°C como temperatura interna. Sin embargo al comparar los coeficientes de transferencia de calor y teóricos obtiene diferencias muy altas (70%), indicando que el parámetro que no se consideró fue la variación de la viscosidad por efecto de la temperatura.

De acuerdo a estas investigaciones (Flores, 2005; Llano, 2007; Quintanar, 2008; Pascual, 2011) se encontró que al determinar la viscosidad no consideraron la variación de esta con la temperatura promedio que alcanza el fluido en cada corrida experimental, debido a esto al comparar los coeficientes de transferencia de calor experimentales y teóricos obtienen diferencias muy altas.

Además en dichas investigaciones, solo han trabajado considerado la etapa de calentamiento o la de enfriamiento de manera independiente y durante la operación del equipo han variado el tipo de configuración de raspadores, ya sea alternos, en una solo hilera o en dos hileras, encontrando que existen diferencias al trabajar con diversos productos alimenticios, debido a su comportamiento durante el tratamiento.

Con base en lo anterior es necesario realizar la caracterización del ICSR utilizando las dos filas de unidades de raspado, así como corregir el parámetro de la viscosidad empleado para la determinación de los coeficientes de transferencia de calor teóricos a fin de determinar si este es el responsable de las grandes diferencias respecto a los coeficientes experimentales.

Por otro lado, actualmente se sabe que el uso de un tratamiento térmico eficaz puede disminuir problemas de estacionalidad en algunos frutos. La guayaba al ser un fruto de importante producción en México, además de ser susceptible de sufrir alteraciones indeseables debido a condiciones inadecuadas de acondicionamiento y tratamiento térmico se convierte en un fruto potencial de investigación para mejorar su aprovechamiento en forma de puré. Por lo que es importante mencionar algunas características generales de este fruto.

## 2.7. Guayaba (*Psidium guajava* L.).

El origen de la guayaba (*Psidium guajava* L.) se ubica en las regiones tropicales de América, posiblemente de algún lugar de Centroamérica, el Caribe, Brasil o Colombia. Después del descubrimiento de América se propagó a otros continentes e incluso llegó a creerse que era originaria de Indochina y de Malasia (Asia Meridional) ya que en estos lugares se le conoce desde hace varios siglos y crece en forma silvestre (Yam *et al.*, 2010). La guayaba es una fruta tropical perteneciente a la familia *Myrtaceae*, el procesamiento tecnológico de este fruto ofrece opciones de conservación de la fruta fresca para extender su vida útil, puede ser consumida tanto fresca como procesada en forma de pulpas, jugos, mermeladas y conservas, de gran aceptación en México (Marquina *et al.*, 2008).

Es uno de los frutos más conocidos y estimados en la mayor parte del mundo. En los trópicos y subtrópicos, gracias a su amplia adaptabilidad hacia diferentes tipos de suelos y condiciones climáticas, la guayaba ha alcanzado gran importancia comercial. La producción mundial de guayaba (Cuadro 1) es de alrededor de 1.2 millones de toneladas, la India y China aportan el 61%, México produce el 6% y el resto lo aportan otros países como Tailandia, Indonesia y Brasil (Yam *et al.*, 2010).

**Cuadro 1. Países productores de guayaba en % de participación.**

| País      | Producción (%) | País       | Producción (%) |
|-----------|----------------|------------|----------------|
| India     | 47             | Pakistán   | 6              |
| China     | 14             | Brasil     | 4              |
| Tailandia | 8              | Filipinas  | 3              |
| Indonesia | 7              | Bangladesh | 3              |
| México    | 6              | Nigeria    | 3              |

Fuente: FAO, 2008

En México la producción de guayaba es del orden de las 300 mil toneladas anuales; destacando por su aportación los estados de: Michoacán 44%, Aguascalientes 37%, Zacatecas 13% y el 6% restante, lo aportan el Estado de México, Jalisco (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Estados productores de guayaba en % de participación.**

| <b>Estado</b>  | <b>Producción (%)</b> |
|----------------|-----------------------|
| Michoacán      | 44                    |
| Aguascalientes | 37                    |
| Zacatecas      | 13                    |
| México         | 4                     |
| Guerrero       | 1                     |
| Jalisco        | 1                     |

Fuente: SIAP, 2009

La porción del fruto con más futuro comercial y de mayor importancia de la guayaba es la pulpa, ya que su uso es casi ilimitado como es en la elaboración de puré de guayaba como comida para bebés, extracción de aceite de su semilla, fuente natural de pectina, elaboración de vinos, bebidas nutritivas de guayaba, quesos de frutas, como saborizante en helados, pudines, yogures y producción de bocadillos (Vargas, 2004). La gran aceptación que tiene la guayaba se debe a su valor comercial, digestibilidad, palatabilidad, sabor agradable y valor nutritivo: excelente fuente de las vitaminas A, C, tiamina y riboflavina. En el Cuadro 3 se muestra el contenido de nutrientes en promedio por cada 100 g de pulpa fresca.

**Cuadro 3. Composición química de guayaba por cada 100 g de pulpa.**

| <b>Componente</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Componente</b> | <b>Cantidad</b>          |
|-------------------|-----------------|-------------------|--------------------------|
| Agua              | 82 g            | Vitamina E        | 0.73 $\alpha$ -tocoferol |
| Carbohidratos     | 15.7 g          | Vitamina A        | 31 $\mu$ g RAE*          |
| Proteína          | 1.1 g           | Tiamina           | 0.050 mg                 |
| Grasa             | 0.4 g           | Riboflavina       | 0.050 mg                 |
| Fibra             | 5.3 g           | Niacina           | 1.200 mg                 |
| Vitamina C        | 183.5 mg        | Piridoxina        | 0.143 mg                 |

Fuente: Moreiras *et al.*, 2001; USDA, 2004; citado por Hui, 2006.

\*RAE-Equivalentes en actividad de retinol

Aunque se ha encontrado una alta correlación positiva entre las cantidad de vitamina C y la actividad antioxidante de las frutas (Yoo *et al.*, 2004), se ha demostrado que esta actividad antioxidante no solo es atribuible a esta vitamina, sino a otros fitoquímicos como fenoles, tioles, carotenoides, o tocoferoles presentes en las frutas (Sun *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2003).

Las frutas y vegetales, y en específico la guayaba contienen niveles significativos de componentes biológicamente activos que son benéficos para la salud, siendo una fuente importante de antioxidantes que incrementan la capacidad oxidativa en el plasma (Rojas y Gerschenson, 2001). Por ello, una dieta rica en frutas y vegetales puede contribuir a prevenir enfermedades neurodegenerativas, entre las que se puede mencionar el mal de Parkinson y la enfermedad de Alzheimer, así como enfermedades cardiovasculares, cáncer, diabetes, cataratas, etc. (Karakaya y Kavas, 1999; Martínez- Valverde *et al.*, 2000; Setiawan *et al.*, 2001; Sulaeman *et al.*, 2001; Dewanto *et al.*, 2002; Méndez *et al.*, 2002). Por lo tanto, evaluar los parámetros de calidad como indicadores de termodegradación durante el procesamiento térmico de puré guayaba fueron de vital importancia para asegurar un producto de calidad al consumidor.

## **2.8. Parámetros de calidad en el procesamiento de puré de guayaba.**

Al llevar a cabo un tratamiento térmico, el conocimiento en los cambios de las propiedades bioquímicas en las frutas es de máxima importancia, ya que al ser sometidas a altas y/o bajas temperaturas para inactivar ciertas enzimas influyen en aspectos tan relevantes como la calidad nutricional. Principalmente porque las frutas son importantes aportadores de fitoquímicos o metabolitos secundarios de acción nutracéutica, los cuales evolucionan con los procesos de maduración, almacenamiento y procesamiento térmico (Yoo *et al.*, 2004; Mayer *et al.*, 2005). Los parámetros de calidad que se evaluaron en esta investigación son los que se describen a continuación.

### 2.8.1. Vitamina C

El ácido L-Ascórbico (AA) es la forma biológicamente activa de la vitamina C (Figura 4), que es reversiblemente oxidado a su forma de ácido L-dehidroascórbico (DHA), el cual también tiene actividad biológica, su oxidación genera ácido dicetogulónico, que no posee función biológica (Franke *et al.*, 2004; Timoumi *et al.*, 2007).

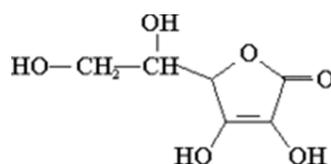


Figura 4. Estructura química de vitamina C.

Desafortunadamente, la vitamina C es inestable y la tasa de degradación de ácido ascórbico depende de las condiciones del medio ambiente como la temperatura y actividad de agua (Shin *et al.*, 2007). Por lo tanto esta vitamina importante en frutas y vegetales, es particularmente útil como indicador de calidad debido a su naturaleza termolábil comparada con otros nutrientes en alimentos (Uddin *et al.*, 2002; Ghani *et al.*, 2002).

### 2.8.2. Actividad antioxidante

Aunque existen diversos trabajos en donde se reporta tanto la cantidad de compuestos fenólicos totales como la actividad antioxidante en guayaba (Contreras *et al.*, 2011; Thaipong *et al.*, 2006; Vasco *et al.*, 2008; Marquina *et al.*, 2008; Restrepo *et al.*, 2009; Rojas y Narváez, 2009; Chen y Yen, 2007; Khairul *et al.*, 2009) no existe un trabajo en el que se exploren diversos factores que pueden influir en los compuestos contenidos en la fracción comestible del puré de guayaba al momento de efectuar el procesamiento térmico en un ICSR. La actividad antioxidante puede ser determinada por diferentes métodos, entre los que se encuentra el método ABTS (llamado así por el reactivo 2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico)) y el FRAP (Poder Antioxidante de Reducción Férrica).

Dentro de los métodos más rápidos, simples operacionalmente y más reproducibles se encuentran los métodos antes mencionados.

#### **2.8.2.1. Ensayo ABTS**

El método ABTS consiste en la generación del radical ABTS, por la reacción entre el ABTS y el persulfato de potasio para producir un cromóforo azul verdoso con absorción máxima a longitud de onda de 734 nm. En presencia de antioxidantes se produce una disminución de la absorbancia del radical ABTS<sup>+</sup>; los resultados suelen ser expresados como  $\mu\text{mol Trolox equivalente/g}$  material analizado.

Este método puede ser utilizado en un amplio intervalo de pH y se aplica para sistemas tanto acuosos como orgánicos (Restrepo *et al.*, 2009).

#### **2.8.2.2. Ensayo FRAP**

De otro lado, el método FRAP consiste en la formación de un complejo férrico con el reactivo TPTZ (2, 4, 6-(tri-(2-piridil-s-triazina))), el cual en presencia de antioxidantes forma un complejo azul de máxima absorción a 595 nm; los resultados se pueden expresar como  $\mu\text{mol Trolox/g}$  o como  $\mu\text{mol Fe(II)/g}$ . Se ha encontrado que el método de FRAP y el método de Folin-Ciocalteu muestran alta correlación (Re *et al.*, 1999; Benzie y Strain, 1996).

#### **2.8.2.3. Polifenoles**

Las guayaba contiene polifenoles, los cuales son metabolitos secundarios de las plantas con actividad antioxidante beneficiosa para la salud humana (Marquina *et al.*, 2008). El consumo de la guayaba reduce el estrés oxidativo y modifica el perfil lipídico, con lo cual reduce el riesgo de enfermedades causadas por radicales libres y el elevado colesterol sanguíneo (Rahmat *et al.*, 2004). Adicionalmente el puré de guayaba producido en México es la opción más económica si se compara con otras pulpas como el durazno, la guanábana, la fresa y la mora, las cuales cuestan el doble.

Para estimar la cantidad de fenoles se utiliza el método de Folin Ciocalteu; este método consiste en la reacción entre el reactivo de Folin Ciocalteu de color amarillo y los grupos fenólicos, lo cual produce un complejo de color azul con máxima absorción a 760 nm; los resultados usualmente se expresan como mg ácido gálico/100 g.

Debido a lo anterior en este estudio se incluye la evaluación de la capacidad antioxidante antes y después del procesamiento térmico de puré de guayaba, con la finalidad de comparar los porcentajes de retención y relacionarlos con los coeficientes de transferencia de calor, para así establecer las mejores condiciones de proceso en el ICSR. Sin embargo otros factores que influyen durante el procesamiento térmico son la actividad enzimática. Entre las enzimas presentes en la guayaba una de las más importantes y termorresistentes es la pectinmetilesterasa, cuya actividad modifica la consistencia del producto.

### **2.8.3. Pectinmetilesterasa**

Durante el procesamiento térmico ocurren cambios importantes en la sustancias pécticas, carbohidratos, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos y otros componentes.

La maduración en los frutos de guayaba se caracteriza por un ablandamiento en la pulpa. El ablandamiento en frutos se asocia con un desorden en la pared celular (Seymour y Gross, 1996) y modificaciones en la fracción péctica, que en la mayoría de los casos ocasiona cambios, los cuales se llevan a cabo en la pared celular durante la maduración (Marin-Rodriguez *et al.*, 2002). En general este ablandamiento se acompaña por la solubilización de pectinas, involucrando la actividad de enzimas como la pectinmetilesterasa (White, 2002).

Por otro lado, los alimentos y en específico los purés de frutas, además de ofrecer un olor, un color y un sabor, exhiben determinado comportamiento mecánico, es decir, reaccionan de un cierto modo cuando se intentan deformarlos.

Unos fluyen fácilmente, otros con dificultad; para estimar este comportamiento mecánico, a nivel industrial su evaluación se lleva a cabo a través de métodos físicos, en donde el valor apreciado no depende del individuo sino de la medición que se realiza instrumentalmente (Muller, 1978; Ibarz, 2005). Básicamente el parámetro de calidad que se ve modificado por el tratamiento térmico y la actividad enzimática, es la viscosidad.

Esta propiedad reológica depende de la cantidad de sólidos totales, la cantidad de sólidos solubles, el tamaño de partícula y la temperatura (Ahmed *et al.*, 2004). El tratamiento térmico puede afectar, como por ejemplo, modificando la fracción de pectina soluble presente en la fruta, cambiando de esta manera la viscosidad del producto (Dutta *et al.*, 2006). Estos cambios le confieren al fruto características sensoriales como color, aroma, sabor y textura y son el resultado de numerosas enzimas principalmente hidrolíticas (Menéndez *et al.*, 2006; Barbosa y Bermúdez, 2010).

En este grupo de enzimas se encuentran las enzimas pécticas, como la pectinmetilesterasa (PME), la cual cataliza la remoción de grupos metoxilo de las poligalacturonanas metiladas, generando grupos carboxílicos libres que afectan el pH y el balance iónico de la pared celular y, consecuentemente, la actividad de otras enzimas hidrolíticas de la propia pared celular (Willats *et al.*, 2001). Por lo tanto, la aplicación de un tratamiento térmico tendrá como objetivo reducir y controlar esta actividad.

No obstante, tratamientos térmicos muy intensos pueden dar lugar al desarrollo de aromas y sabores extraños, así como el deterioro del color, valor nutritivo y funcional del producto. Los cambios de color debidos al procesamiento térmico en las frutas, están relacionados con el metabolismo del vegetal, que se manifiesta con la degradación de algunos pigmentos y aparición o afloramiento de otros, lo cual es motivado por aspectos, como la temperatura y tiempo de proceso (Rodrigo *et al.*, 2006; Cheng *et al.*, 2007).

#### 2.8.4. Color

El color es una característica de gran importancia en la evaluación física y de calidad en los alimentos (Pérez, 2003).

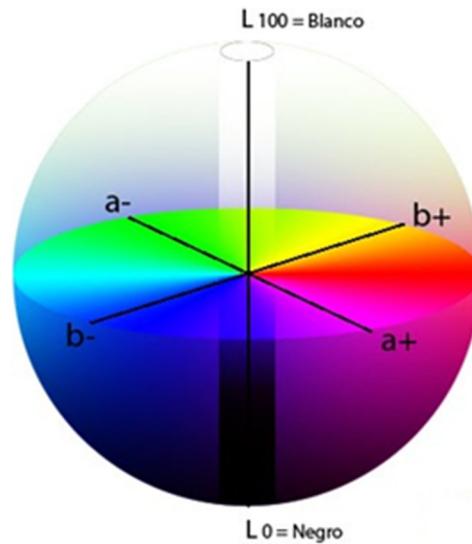
Por otra parte, en ciertos alimentos la aparición de coloraciones marrones frecuentemente indeseadas, se asocia a reacciones de pardeamiento no enzimático (reacción de Maillard, propiciada por las altas temperaturas), pardeamiento de tipo enzimático y el producido por la caramelización de los azúcares, en la superficie del alimento. Todo esto puede afectar en forma negativa a la presentación y al sabor de los productos (Contreras, 2006).

Cuando el deterioro del color es visualmente extenso el producto resulta inaceptable, por lo que industrialmente, el color puede ser una característica determinante para el éxito comercial de innumerables productos. Debido a ello se vuelve cada día más imprescindible su control, lo que supone poder medir y comparar el color (Contreras, 2006).

En este sentido, es necesario disponer de métodos objetivos de medida de esta propiedad que permitan la obtención de valores comparables y reproducibles.

En general se aplican técnicas sensoriales e instrumentales, siendo estas últimas de gran utilidad en el manejo en poscosecha de frutas y hortalizas (Planella, 1987; Lana *et al.*, 2006; Salvador, 2007). De igual manera, el color se considera como uno de los índices de madurez más relevante en frutas, constituye una medida rápida, funcional y muy práctica del estado de madurez.

El color de un alimento, incluyendo las frutas puede ser identificado a partir del sistema "CIELab" o "L, a, b" donde "L" corresponde a la luminosidad, con escala de 0 a 100, "a" concierne al intervalo de colores entre el verde y el rojo, y "b" representa al intervalo de colores entre el azul y el amarillo (Figura 5), con cuyas combinaciones se puede expresar cualquier color y su evolución en el tiempo (Restrepo, 1995; Hernández, 2009).



**Figura 5. Representación espacial del modelo CIELAB.**

Por lo tanto, es importante tomar en cuenta la evaluación del color durante el tratamiento térmico de puré de guayaba, ya que es un parámetro fundamental en la calidad del puré.

Todos estos análisis de los parámetros de calidad se efectuaron siguiendo los pasos que se describen en el capítulo V, que hace referencia a los materiales y métodos usados durante la presente investigación.

### III. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la transferencia de calor sigue siendo un campo de gran interés en investigaciones científicas y de ingeniería en alimentos. Uno de los problemas en las operaciones unitarias en la industria de los alimentos ha sido la eficiencia en el calentamiento o enfriamiento de los fluidos alimentarios. Una forma de evaluar esta eficiencia ha sido mediante la determinación de los coeficientes de transferencia de calor.

Existen varios estudios de transferencia de calor que se han llevado a cabo en intercambiadores de calor de superficie raspada (ICSR). Entre los equipos más utilizados para llevar a cabo tratamientos térmicos se tienen a los ICSR. La principal ventaja de estos equipos es que evitan la acumulación de partículas en la superficie de intercambio de calor por medio de raspados periódicos mediante unas placas raspadoras.

Al respecto, varias investigaciones han considerado el proceso de calentamiento o de enfriamiento de manera independiente. Solo un trabajo encontrado, evaluó el proceso de forma global, sin embargo al comparar los coeficientes de transferencia de calor experimental y teórico evaluado por la ecuación de Skelland, reportó diferencias muy altas, concluyendo que estas diferencias podrían ser debidas a que no se determinó la viscosidad a la temperatura promedio del fluido.

Por lo tanto, surge la necesidad de realizar la caracterización del ICSR estudiando las tres etapas (calentamiento, pre-enfriamiento y enfriamiento) de manera conjunta, debido a que en la industria química, biológica y de procesamiento de alimentos consideran el proceso de forma global. Además, es necesario realizar una corrección de la viscosidad con la temperatura de proceso para disminuir el porcentaje de diferencia al evaluar los coeficientes de transferencia de calor.

Esta caracterización se realizará considerando como factores de proceso el flujo de alimentación, temperatura del medio de calentamiento y velocidad de rotación de raspadores utilizando como fluido de trabajo puré de guayaba, considerado un fruto de gran producción en México y que contiene niveles significativos de componentes biológicamente activos que son benéficos para la salud.

La aportación de esta investigación será determinar la transferencia de calor mediante la comparación del coeficiente interno de transferencia de calor teórico por la ecuación de Skelland y experimental. Evaluando al mismo tiempo el efecto sobre los parámetros de calidad y distribución de tiempos de residencia, presentando así una nueva alternativa de procesamiento del puré de guayaba, donde el tratamiento térmico permita conservar la mayor parte de las propiedades bioquímicas del alimento.

---

---

## IV. OBJETIVOS

### 4.1. Objetivo general

- Determinar los coeficientes de transferencia de calor en intercambiadores de superficie raspada (calentamiento, pre-enfriamiento y enfriamiento) en el tratamiento térmico de puré de guayaba, analizando el efecto sobre sus componentes bioquímicos.

### 4.2. Objetivos específicos

- Cuantificar las características fisicoquímicas (densidad, sólidos solubles, color y viscosidad) y térmicas (capacidad calorífica y conductividad térmica), parámetros indispensables en el cálculo teórico del coeficientes interno de transferencia de calor.
- Calcular los coeficientes internos de transferencia de calor experimental (utilizando las temperaturas de proceso) y teóricos (mediante la ecuación de Skelland).
- Realizar la comparación entre los coeficientes experimentales y teóricos para establecer la aplicabilidad de la ecuación de Skelland para fluidos alimenticios no newtonianos.
- Determinar las curvas de distribución de tiempos de residencia y tiempo promedio de residencia del puré en el ICSR.
- Evaluar la calidad del puré de guayaba procesado mediante la cuantificación de la actividad de la pectinmetilesterasa y la actividad antioxidante realizando la comparación antes y después del tratamiento.

---

---

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. Materia prima

Se utilizó puré de guayaba con 11 °Bx de sólidos solubles. El puré se adquirió de un proveedor externo (Ingeniería de frutas procesadas S.A. de C.V.). Las corridas experimentales se realizaron en septiembre y octubre de 2010, de un lote que se adquirió durante agosto del mismo año, esto con la finalidad de mantener la homogeneidad en las muestras. Antes de realizar las corridas en el ICSR se realizó la descongelación colocando en refrigeración y posteriormente un atemperado del puré a  $20\pm 1$  °C.

### 5.2. Equipo, instrumentos de medición, reactivos y material de laboratorio.

#### Equipo

- Intercambiador de Calor de Superficie Raspada (ICSR), modelo piloto, marca Jersa.
- Refrigerador/congelador Kenmore modelo CSXEAS
- Balanza analítica marca A&D modelo GR-120
- Colorímetro Hunter Lab (modelo MiniScan XE Plus No. 45/OL.)
- Liofilizador (Labconco®)
- Refractómetro ATAGO
- Reómetro Anton Paar-Physica MCR301

#### Instrumentos de medición

- Escáner por lectura de temperaturas Cole Parmer, modelo Thermocuple.
- Lector Elisa (SpectraMax 190), Micropipetas de 20, 100, 200 y 1000 µL y pipeta multicanal, Placas para lector de Elisa.
- Termopares (tipo T) de cobre-constantan
- Software Minitab

#### Reactivos

- 2,6-diclorofenolindol, SIGMA.
- Folin-Ciocalteu 2N, Trolox y TPTZ (2, 4, 6-(tri-(2-piridil-s-triazina))), SIGMA.
- ABTS (2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico)), SIGMA.

### 5.3. Descripción del Intercambiador de Calor de Superficie Raspada.

En la Figura 6 se observa el diagrama general del ICSR Jersa con el que se realizó el presente trabajo.

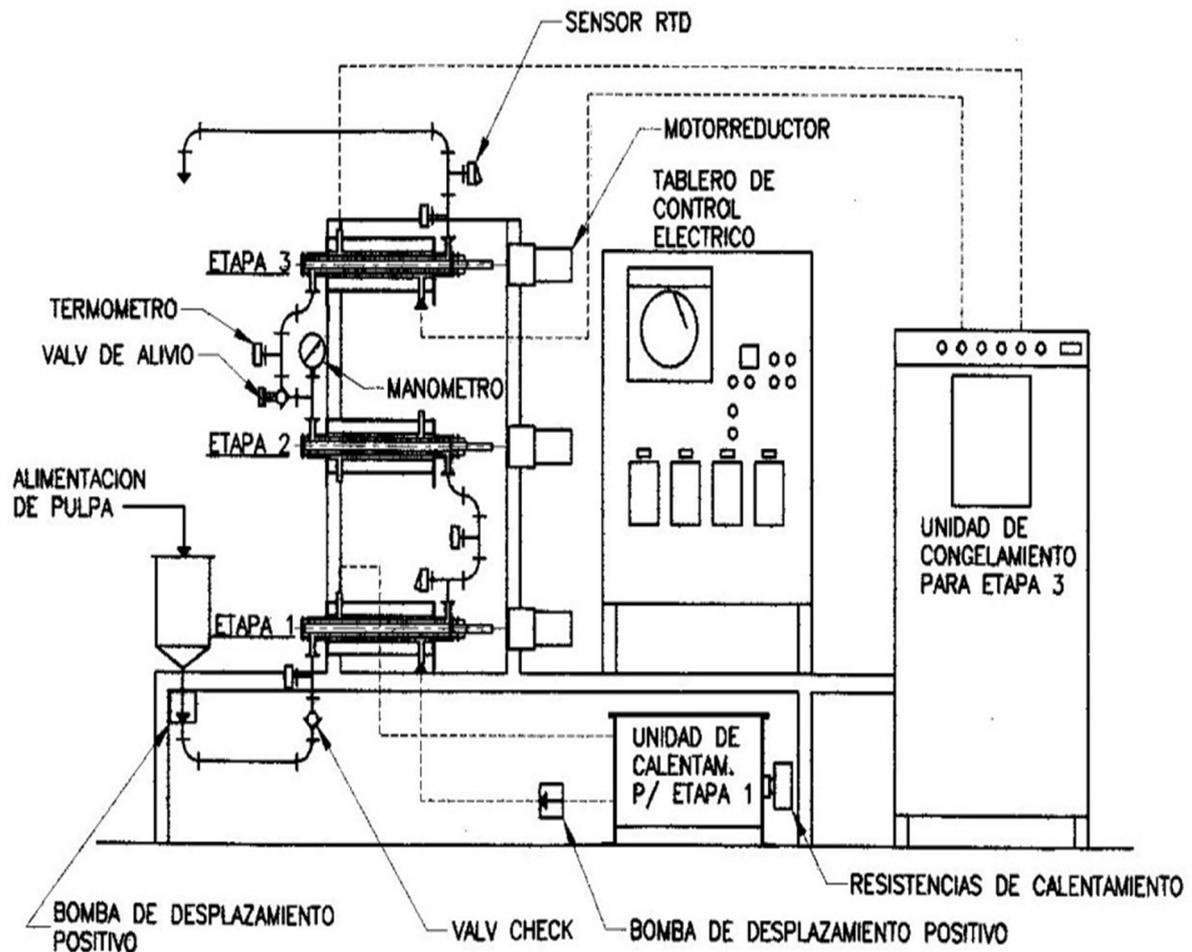
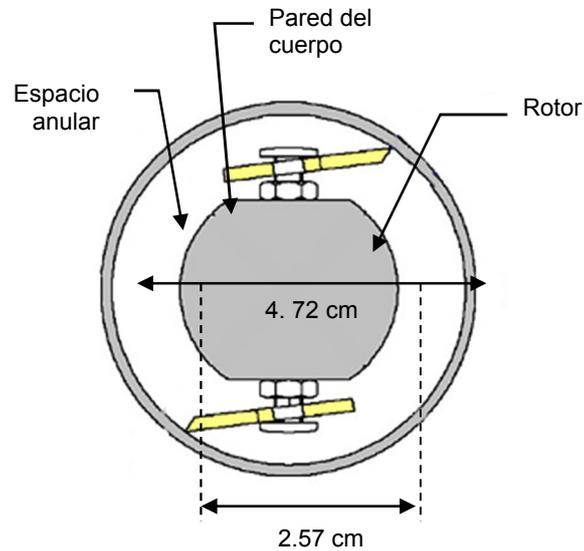


Figura 6. Diagrama del ICSR a nivel piloto.

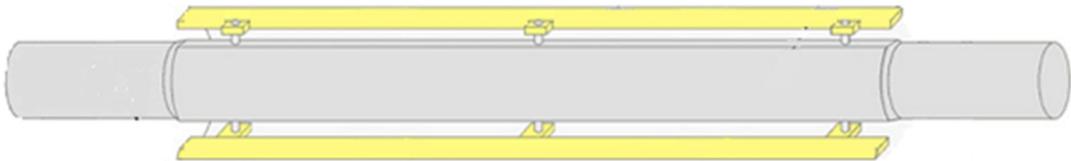
Las características son: capacidad máxima de 20 L/h; es de acero inoxidable. Cada intercambiador tiene dimensiones de 51.5 cm de largo y una capacidad de carga de 634 cm<sup>3</sup> en arreglo horizontal.

En el interior gira un rotor que tiene un diámetro de 2.57 cm y consta de 2 raspadores de teflón de 6.52 x 2.3 cm dispuestos en dos filas como se muestra en la Figura 7.



**Figura 7. Dimensiones del rotor del ICSR.**

Para esta investigación la distribución de los raspadores fue con las dos filas tal como se observa en la siguiente Figura 8.



**Figura 8. Arreglo de las placas raspadoras.**

#### 5.4. Diseño experimental.

De acuerdo a estudios realizados por Flores, 2005; Llano, 2007; Quintanar, 2008 y Pascual, 2011, se determinaron las condiciones de operación en el ICSR las cuales fueron: flujo de alimentación (FA) de 200, 300 y 400 mL/min, velocidad de rotación de raspadores (VRR) de 100, 300 y 500 rpm y temperatura de calentamiento (TC) de 145, 150 y 155 °C, utilizando puré de guayaba como fluido de trabajo. Una vez establecidos los límites de operación para el estudio de la transferencia de calor, se definió un diseño factorial  $2^3$  (Cuadro 4), con tres factores a dos niveles, con tres repeticiones en el punto central y el diseño experimental desarrollado por el programa Minitab 16 se observa en el Cuadro 5.

**Cuadro 4. Diseño factorial  $2^3$ .**

| FACTOR         | NIVEL<br>BAJO | NIVEL<br>ALTO | PUNTO<br>CENTRAL |
|----------------|---------------|---------------|------------------|
| FA<br>(mL/min) | 200           | 400           | 300              |
| VRR (rpm)      | 100           | 500           | 300              |
| TC (°C)        | 145           | 155           | 150              |

**Cuadro 5. Diseño experimental.**

| NT | FA<br>(mL/min) | VRR<br>(rpm) | TC<br>(°C) |
|----|----------------|--------------|------------|
| 1  | 200            | 100          | 145        |
| 2  | 400            | 100          | 145        |
| 3  | 200            | 500          | 145        |
| 4  | 400            | 500          | 145        |
| 5  | 200            | 100          | 155        |
| 6  | 400            | 100          | 155        |
| 7  | 200            | 500          | 155        |
| 8  | 400            | 500          | 155        |
| 9  | 300            | 300          | 150        |
| 10 | 300            | 300          | 150        |
| 11 | 300            | 300          | 150        |

Las variables respuesta fueron:

- Coeficiente interno de transferencia de calor experimental y teórico
- Retención de vitamina C, polifenoles totales, actividad antioxidante, evaluación de la actividad residual de PME y cambio en color.

NT: Número de tratamiento, FA: Flujo de alimentación, VRR: Velocidad de rotación de raspadores, TC: Temperatura de calentamiento.

## 5.5. Métodos

### 5.5.1. Desarrollo experimental.

El desarrollo experimental se realizó como se muestra en la Figura 9.

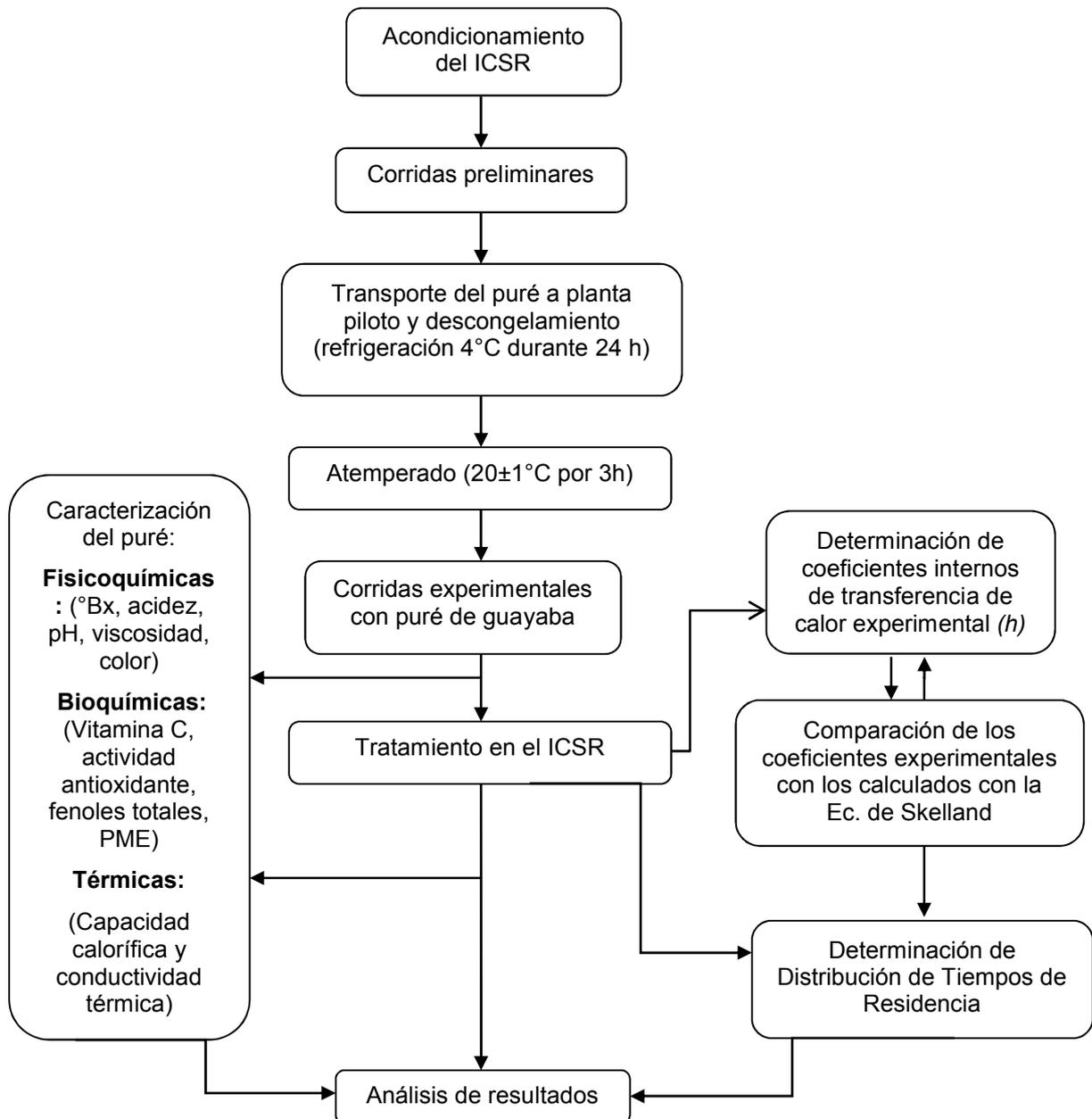


Figura 9. Diagrama de flujo del desarrollo experimental.

**5.5.2. Metodología para la realización de una corrida experimental.**

Para realizar cada corrida experimental, el ICSR se llevó a condiciones de estado estacionario. Para alcanzar estas condiciones, primero se encendió la unidad de calentamiento, transcurridos 30 minutos, se procedió a encender la unidad de enfriamiento con la finalidad de que ambas unidades alcanzaran al mismo tiempo la temperatura ideal para cada uno de los tratamientos. Enseguida se ajustó la velocidad de rotación de raspadores. Posteriormente se hizo pasar agua de la llave, que sirvió como medio de pre-enfriamiento para la etapa 2. Una vez que se controlaron estas condiciones, se efectuaron pruebas preliminares haciendo fluir agua por los intercambiadores, manteniendo un nivel definido en la tolva de alimentación y registrando las temperaturas en cada una de las etapas mediante un escáner por lectura de temperaturas. Al término de las pruebas preliminares se retiró el agua que se hizo circular por los intercambiadores y se cambió por el puré de guayaba. Se reajustó la velocidad de los raspadores y el flujo de alimentación, debido al cambio del tipo de fluido. Y finalmente se registraron las temperaturas, datos indispensables para el cálculo de los coeficientes internos de transferencia de calor experimental, adicionalmente fue necesario efectuar una caracterización de la materia prima de acuerdo a los parámetros mencionados del apartado 5.5.3 al 5.5.9.

**5.5.3. Determinación de pH (AOAC, 1995).**

La determinación de pH se realizó antes y después del tratamiento en el puré de guayaba. Se realizó con el potenciómetro utilizando las soluciones reguladores de pH 4 y 7 para calibrarlo; se sumerge el electrodo en la muestra de tal manera que lo cubra perfectamente a una temperatura de  $20 \pm 0.5$  °C, se lee el valor de pH directamente en la escala del potenciómetro.

**5.5.4. Determinación de sólidos solubles (NMX-F103-1965).**

La determinación de °Bx se realizó en el puré de guayaba antes y después del tratamiento. Primero se realizó la calibración del refractómetro colocando unas gotas de agua a 20 °C sobre el prisma, enseguida se ajustó la escala a cero, y se secó con algodón. Después se colocaron unas gotas de la muestra sobre el

---

---

prisma, cerrar y ajustar con la perilla hasta que el campo visual se divida en dos partes, una luminosa y otra oscura. La línea divisora entre esas dos partes, se le conoce como línea margen y se hace la lectura directamente del porcentaje de sólidos en la escala de grados Brix.

#### 5.5.5. Determinación de acidez (AOAC, 1995).

Se pesaron 10 g de muestra y se llevaron a 100 mL con agua destilada, posteriormente se filtró y se tomó una alícuota de 100 mL por triplicado y a cada una se le adicionaron 3 gotas de fenolftaleína al 1% y se tituló con hidróxido de sodio al 0.1N. Para obtener el porcentaje de acidez titulable reportado como ácido cítrico se utilizó la Ecuación 17.

$$\% \text{ácido cítrico} = \frac{(G_{NaOH})(N_{NaOH})(meq)(V_T)}{(m)(a)} \quad (17)$$

Dónde:  $G_{NaOH}$ : Gasto de NaOH, mL,  $N_{NaOH}$ : Normalidad de hidróxido de sodio, meq: miliequivalentes del ácido cítrico, 0.0064 g/mL,  $V_T$ : Volumen total para determinación de acidez, mL,  $m$ : masa de la muestra, g,  $a$ : alícuota, mL.

#### 5.5.6. Determinación de humedad (AOAC, 1995).

La determinación de humedad de la pulpa se realizó por el método de la termobalanza a 70 °C programada con una variación de humedad de 0.01 g en 60 segundos, usando 10 mL de pulpa de guayaba y una cama de arena (lavada y secada) usada como soporte para aumentar la superficie de contacto y reducir el tiempo de la determinación por formación de costras.

#### 5.5.7. Determinación de densidad aparente.

La densidad aparente se determinó de la siguiente manera: se tomaron dos matraces aforados de 100 mL, se pesaron y posteriormente se aforó uno con agua y el otro con puré de guayaba y se pesaron nuevamente, al resultado del peso final se le restó el peso inicial del matraz de vacío. Se consideró la densidad del agua como referencia la cual debe ser lo más cercano a 1000 kg/m<sup>3</sup> a la temperatura de 20±1 °C, para así obtener resultados confiables.

---



---

### 5.5.8. Determinación de la capacidad calorífica (Ecuación de Siebel, citado por Heldmand y Lund, 2007).

La capacidad calorífica del puré de guayaba se calculó de acuerdo a la Ecuación 9. Considerando el contenido de humedad base húmeda del puré.

### 5.5.9. Determinación de la conductividad térmica (Ecuación de Sweat, citado por Rao y Rizvi, 1995).

La conductividad térmica del puré se determinó de acuerdo a la Ecuación 10, utilizando el contenido de humedad base húmeda del puré.

### 5.5.10. Determinación de la viscosidad aparente (Reómetro Anton Paar-Physica MCR301).

La determinación de la viscosidad se llevó a cabo en un reómetro Anton Paar-Physica MCR301, Mestechnick, Sturgatt, Alemania. Se colocó aproximadamente 1 mL de muestra de puré de guayaba, se utilizó la geometría plato-plato (PP50/TG 5752) de 49.925 mm de diámetro y 1.0 mm de espesor. La temperatura de trabajo fue a 20 y 40°C, se utilizaron estas temperaturas porque son las temperaturas promedio del fluido para la etapa de enfriamiento y calentamiento, respectivamente. Se colocó la geometría en posición de medición en el intervalo de 0 a 300 rpm durante 300 segundos. Con los datos obtenidos mediante el software rheoplus se elaboraron las curvas de flujo y de viscosidad.

### 5.5.11. Determinación experimental del coeficiente interno de transferencia de calor.

Para calcular el coeficiente interno de transferencia de calor experimental ( $h$ ) en la pared interna del intercambiador de calor se utilizó la siguiente metodología (Geankoplis, 1999).

a) La temperatura promedio ( $t_w$ ) de la pared interna del intercambiador de calor (°C) se estimó con la Ecuación 18.

$$t_w = \frac{\left( \frac{t_1 + t_2}{2} + \frac{T_1 + T_2}{2} \right)}{2} \quad (18)$$

Esta temperatura se calculó de esta forma debido a que el intercambiador de calor usado para esta investigación no cuenta con termopares que midan directamente la temperatura de la pared interna. La estimación de la temperatura de la pared ( $t_w$ ) se realizó como una media entre la temperatura promedio del puré ( $T_1$  y  $T_2$ ) y del medio de calentamiento ( $t_1$  y  $t_2$ ) para cada condición de operación.

- b) El cálculo de la temperatura promedio ( $T_m$ ) del fluido de proceso (°C)  
Ecuación 19.

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (19)$$

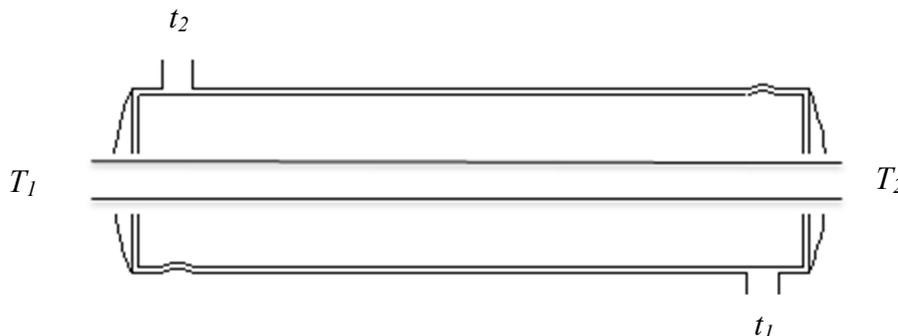
- c) El calor absorbido  $Q$  (J/s) por el puré al pasar por el intercambiador se calculó mediante la Ecuación 20.

$$Q = m C_p (T_1 - T_2) \quad (20)$$

- d) El coeficiente interno de transferencia de calor experimental ( $W/m^2\text{°C}$ ) se calculó con la ley de enfriamiento de Newton con la Ecuación 21.

$$h = Q / A (T_m - t_w) \quad (21)$$

Las temperaturas utilizadas en cada una de las ecuaciones mencionadas anteriormente se observan mejor la Figura 10.



**Figura 10. Esquema del intercambiador de calor de superficie raspada indicando las temperaturas de entrada y salida de cada fluido.**

Dónde:

$T_1$  y  $T_2$  Temperatura del puré de guayaba a la entrada y salida del intercambiador, respectivamente en °C.

$t_1$  y  $t_2$  Temperatura del medio de calentamiento a la entrada y salida del intercambiador, respectivamente en °C.

### 5.5.12. Determinación del coeficiente interno de transferencia de calor teórico (Skelland *et al.*, 1962).

Los coeficientes de transferencia de calor teóricos se determinaron de acuerdo a la ecuación de Skelland *et al.*, (1962) Ecuación 1.

Para utilizar esta ecuación fue necesario determinar la velocidad axial del puré mediante la la Ec. (22) y el área anular de transferencia de calor Ec. (23) como se observa en la Figura 11.

$$V = G/A \quad (22)$$

$$A = \pi/4(D^2 - d^2) \quad (23)$$

Dónde:

$G$  = gasto volumétrico en  $m^3/s$

$V$  = velocidad axial de flujo del fluido en  $m/s$

$A$  = área anular en  $m^2$

$D$  = diámetro del tubo interno en  $m$

$d$  = diámetro del rotor en  $m$

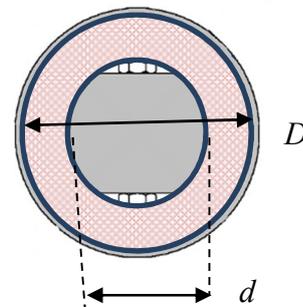


Figura 11. Área anular de transferencia de calor.

### 5.5.13. Evaluación de las curvas de distribución de tiempos de residencia (Quintanar, 2008).

Se elaboraron las curvas necesarias para el cálculo de la distribución de tiempos de residencia, utilizando el método experimental estímulo-respuesta, en el que se inyectó una cantidad de muestra previamente adicionada con NaCl a concentración conocida, que se usa como trazador.

Para realizar cada inyección, el ICSR se llevó a condiciones de estado estacionario, se inyectó el trazador en la corriente de alimentación, específicamente en la conexión que está ubicada inmediatamente antes de la entrada al cuerpo de intercambio (50 g de puré con 15 g de NaCl). Para la elaboración de la curva tipo el pulso se inyectó a tiempo cero con una jeringa adaptada a la tubería de alimentación del intercambiador.

---

---

Se tomaron muestras a la salida del ICSR inmediatamente, cada 10s sin intervalo entre éstos, en frascos de vidrio de boca ancha (Quintanar, 2008).

Para realizar el pulso se usó como inyector una jeringa de 20 mL de capacidad que se muestra en la Figura 12. Con este inyector se evitó la acumulación de producto en su interior y se asegura que el trazador sea inyectado en un menor tiempo, por lo que se acerca más a un pulso.



**Figura 12. Inyector ideal usado para introducir 10 mL el trazador al ICSR.**

Se realizó la medición de tiempos de residencia promedio de los tratamientos seleccionados, se efectuó una mezcla de 50 g de puré fresco con 15 g de cloruro de sodio, de la cual se tomaron 10 mL para usarlos como trazador. Se consideró inyectar esa cantidad de trazador basado en la bibliografía consultada, en donde se usan soluciones saturadas de cloruro de sodio (NaCl), para realizar el pulso con un volumen de 5 mL (Mabit *et al.*, 2004) a 10 mL (Ditchfiel *et al.*, 2006) de esta solución a la entrada del ICSR. A las muestras recolectadas se les determinó la conductividad y se convirtió en concentración del trazador mediante una curva tipo que se elaboró con la mezcla seleccionada adicionada de 0 a 0.05 g de NaCl en 10 g de puré para determinar la conductividad correspondiente a cada concentración. Se tomaron un total de 13 muestras para elaborar la curva tipo.

Para el flujo de 200 mL/min, las muestras se comenzaron a tomar después de dejar transcurrir 2.5 minutos posteriores al pulso realizado. Posterior a esto, las muestras subsecuentes fueron tomadas cada 22 segundos (s) sin intervalo entre ellas. Para el flujo de 300 mL/min se tomaron las muestras después de transcurrir 2 minutos, las muestras subsecuentes fueron tomadas cada 18 s sin

intervalo entre muestras y por último para el flujo de 400 mL/min, de dejaron transcurrir 1.5 minutos, las muestras posteriores se tomaron cada 14 s sin intervalo entre muestras después de inyectar el trazador tomando un total de 18 muestras para cada tratamiento a las cuales se les midió la conductividad para interpolar los resultados en la curva tipo (Anexo 5) obteniendo los datos que se observan en la Figura 20. Posteriormente se realizaron los cálculos necesarios para la obtención de las curvas de RTD, mencionados en el apartado 2.5.

### 5.6. Evaluación del color del producto.

La determinación de color en forma instrumental se hizo con un colorímetro Hunter Lab (modelo MiniScan XE Plus No. 45/OL, Hunter Associates Laboratory, Inc, U.S.A.), leyendo con un iluminante tipo D<sub>65</sub> (luz de día), observador 10°, obteniendo los factores iniciales y finales de “L”, “a” y “b” del sistema Hunter. De las muestras de puré tratados se tomaron 30 g. El colorímetro se calibró con un blanco y negro estándar. La determinación de color se realiza colocando la muestra dentro de una celda rectangular de vidrio óptico de 5 cm de longitud, procurando eliminar todas las burbujas de aire que pudieran quedar atrapadas. Las paredes de la celda se limpian y la celda se coloca frente a la fuente de luz cubriéndola con una placa de cartón oscura. De igual manera se continúa a realizar 3 mediciones de la muestra, obteniendo el valor promedio. La evaluación del color de las muestras tratadas se realizó comparando su color con el de un testigo, que es la muestra de puré tomada antes del tratamiento.

Con estos valores se calcularon los siguientes parámetros; cambio de color total. Calculado con la Ec. (24):

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (24)$$

Dónde:

$$\Delta L = \text{Valor "L*" final} - \text{Valor "L*" inicial}$$

$$\Delta a = \text{Valor "a*" final} - \text{Valor "a*" inicial}$$

$$\Delta b = \text{Valor "b*" final} - \text{Valor "b*" inicial}$$

## 5.7. Preparación de extracto para actividad enzimática de puré de guayaba

Para la obtención de extractos para la determinación de actividad enzimática se pesaron 100 g de muestra del puré fresco y se mezclaron con 100 mL de solución extractora (NaCl al 5%) homogeneizando perfectamente. Este extracto se dejó en refrigeración por 48 h y se filtró para obtener el extracto, se mantuvo en congelación y se utilizó para realizar las determinaciones de pectin-metil-esterasa.

### 5.7.1. Determinación de actividad de pectin-metil-esterasa (Hultin, 1948)

La determinación de la actividad de esta enzima está en función de la disminución del pH durante la reacción, indicando que la enzima está actuando sobre los grupos metilados de la pectina favoreciendo así a la formación de grupos carboxilos que son neutralizados con NaOH 0.01M hasta nuevamente alcanzar el pH 8.0. La técnica consistió en calibrar el potenciómetro a pH 8.0, a temperatura ambiente. Enseguida en un vaso de precipitado se adicionaron 5 mL de solución de pectina 1%, 3 mL de agua destilada, 0.7 mL de NaOH 0.4N. Posteriormente se colocó sobre un agitador magnético, se sumergió el electrodo y se encendió el agitador y el potenciómetro. Utilizando una pipeta se adicionaron 1 mL del extracto enzimático a temperatura ambiente, en el instante en que se inició la adición, se registró el tiempo cero. Durante cinco minutos exactos se mantuvo constante el pH a 8.0, mediante la adición de NaOH 0.01N, contenido en una bureta. Una vez transcurridos los cinco minutos, se registró el gasto de NaOH y se dio por terminada la reacción. Con los datos obtenidos del gasto de NaOH 0.01N y se realizaron los cálculos mediante la Ecuación 25.

$$UPME = \frac{(G_{NaOH}) (N_{NaOH}) (1000)}{(t) (E)} \quad (25)$$

Dónde:

*UPME*: miliMoles de sustrato transformado en cada gramo de pulpa por minuto

*G<sub>NaOH</sub>*: Gasto de NaOH, mL,

*N<sub>NaOH</sub>*: Normalidad de hidróxido de sodio

*t*: tiempo de reacción, 5 minutos

*E*: mL de extracto en cada mL del volumen total de reacción

---

---

El valor  $E$  se determinó utilizando la siguiente ecuación.

$$E = \frac{E_1}{UPME} \quad (26)$$

Dónde:

$E$ : mL de extracto en cada mL del volumen total de reacción

$E_1$ : Volumen del extracto utilizado, 2 mL

$UPME$ : miliMoles de sustrato transformado en cada gramo de pulpa por minuto

### **5.8. Determinación de Vitamina C (Método de Robinson Stock, citado por Rangana, 1986).**

El método de determinación directa está basado en la cuantificación del exceso de 2,6-diclorofenol-indofenol, el cual disminuye la intensidad de su color debido al ácido ascórbico presente en la muestra y en la solución de los estándares.

- Reactivos
  1. Solución de ácido metafosfórico al 2%.
  2. Solución indicadora: se disolvieron 100 mg de 2,6-diclorofenolindol y 4 mg de bicarbonato de sodio en agua destilada caliente (85-95°C), se enfrió y se aforo a 100 mL. Se filtró y se diluyeron 25 mL a 500 mL con agua destilada.
  3. Soluciones estándares de ácido ascórbico: se pesó exactamente 100 mg de ácido ascórbico y se aforo hasta 100 mL con  $HPO_3$  al 2%. Se diluyeron 4 mL de esta solución hasta 100 mL con  $HPO_3$  al 2% (1 mL = 40µg de ácido ascórbico).
- Procedimiento:
  1. Preparación de la muestra. Se pesaron 10 g de muestra y se aforó hasta 100 mL con  $HPO_3$  al 2%.
  2. Curva estándar: en tubos de vidrio se colocaron los siguientes volúmenes de la solución estándar de ácido ascórbico 1, 2, 3, 4 y 5 mL totales con  $HPO_3$  al 2%. Se adicionaron 10 mL de la solución indicadora y se tomó la lectura dentro de los 15 a 20 segundos de

reacción. Se llevó el equipo al 100% de transmitancia con un blanco de 5 mL de HPO<sub>3</sub> al 2% y 10 mL de agua. Se tomó la medición de la longitud de onda a 518 nm, obteniendo la curva tipo absorbancia vs concentración.

3. Muestra: se tomaron 5 mL del extracto (o menos y se llevaron a 5 mL con HPO<sub>3</sub> al 2%) y se adicionaron 10 mL de la solución indicadora. Se procedió a leer su absorbancia a 518 nm con un blanco de 5 mL del extracto y 10 mL de HPO<sub>3</sub> al 2%.

- Cálculos:

La concentración de ácido ascórbico de la curva estándar y de la muestra se realizó a través de la Ecuación 27.

$$\frac{\text{mg de ácido ascórbico}}{100\text{g de muestra}} = \frac{A_c \times B \times 100}{C \times 1000 \times m} \quad (27)$$

Dónde:

$A_c$ : Contenido de ácido ascórbico estimado en la curva tipo, mg

$B$ : Volumen del aforo, 1000 mL

$C$ : Volumen de la solución, 5 mL

$m$ : Masa de la muestra, g

## 5.9. Evaluación de la capacidad antioxidante

### 5.9.1. Compuestos fenólicos totales y actividad antioxidante

Debido a la naturaleza de la materia prima y para facilitar la obtención de los extractos fue necesario liofilizar 30 mL de puré de cada uno de los tratamientos en un liofilizador Labconco<sup>®</sup>, enseguida se realizó la extracción. La obtención de los extractos para la medición de fenoles totales y actividad antioxidante se llevó a cabo luego de un día de almacenamiento. Se pesó 1 g de muestra liofilizada y se le agregaron 5 mL de metanol. La mezcla se colocó en un vial y fue agitada en un sonicador durante 30 minutos a temperatura ambiente. Posteriormente se centrifugo a 8500 rpm durante 5 minutos a 4 °C.

El sobrenadante se filtró y se llevó a 5 mL con etanol, enseguida se colocó en viales ámbar en la oscuridad a 20 °C. Finalmente, se efectuó la cuantificación de fenoles totales y de actividad antioxidante.

#### **5.9.1.1. Compuestos fenólicos totales**

El contenido de fenoles totales fue determinado por el método de Folin-Ciocalteu (Singleton *et al.*, 1999), adaptado al ensayo en placas de 96 pozos, descrito por Dicko *et al.*, (2002), con algunas modificaciones. Primero se elaboró una curva de calibración con ácido gálico (0, 2, 4, 6, 8, 10, 12  $\mu$ L de ácido gálico). Un volumen de 50  $\mu$ L de los extractos se mezcló con 200  $\mu$ L de agua destilada y 125  $\mu$ L de Folin 1N. La mezcla se colocó en agitación 5 minutos en el sonicador.

Enseguida se adicionaron 625  $\mu$ L de carbonato de sodio al 20%. Después de 2 horas de reposo en la oscuridad, se procedió al llenado de la placa adicionando 230  $\mu$ L de la solución más 20  $\mu$ L del extracto, y se tomó la lectura en un lector Elisa (SpectraMax 190) de placas de 96 pozos a una longitud de onda de 760 nm. Los resultados se expresaron como equivalentes de ácido gálico (mg ácido gálico/100 g de muestra fresca).

#### **5.9.1.2. Capacidad antioxidante**

Se emplearon los ensayos ABTS (llamado así por el reactivo 2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazolina-6-ácido sulfónico)) y el FRAP (Poder Antioxidante de Reducción Férrica).

Para el ensayo ABTS, se efectuó de acuerdo al método de Loarca-Piña *et al.*, (2010) con algunas modificaciones. Se preparó una solución compuesta por ABTS 7 mM y persulfato de potasio 140 mM. La mezcla (solución stock) se dejó reposar durante 12 horas a temperatura ambiente en la oscuridad para que se genere el radical. Pasadas las 12 horas se hizo una dilución de la siguiente manera. Dentro de un vial forrado con papel aluminio se mezcló 1000  $\mu$ L de la solución stock que contiene el ABTS y 4.5 mL de etanol. Esta nueva solución debe tener una absorbancia entre 0.7 y 1, para lo cual fue necesario verificar este valor en el lector Elisa a una longitud de onda de 734 nm. La solución de ABTS se preparó el mismo día del ensayo.

Enseguida se efectuaron curvas de calibración a concentraciones entre 50 y 800  $\mu\text{M}$  de Trolox.

Para las muestras se tomaron 20  $\mu\text{L}$  del extracto más 230  $\mu\text{L}$  de la solución ABTS y se midió la absorbancia a 734 nm. Los resultados se expresan en  $\mu\text{Mol}$  equivalentes de Trolox/100 g de muestra fresca.

En el caso del ensayo FRAP, se realizó de acuerdo a el método de Firuzi *et al.*, (2005) con algunas modificaciones. Las soluciones stock se prepararon siempre utilizando el reactivo fresco constituido por buffer de acetato de sodio 300 mM a pH 3.6, 5 mL de TPTZ (2, 4, 6-(tri-(2-piridil-s-triazina))) 10 mM disuelto en HCL 40 mM y 10 mL de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  10 mM. La solución de trabajo (FRAP) fue preparada con la mezcla de 10 mL de buffer de acetato de sodio, 1 mL de la solución de TPTZ y 1 mL de la solución de  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  a una temperatura de 37 °C. Se preparó una curva de calibración con  $\text{Fe}_2\text{SO}_4$  a concentraciones entre 72 y 1080 mM. Para las muestras se tomaron 25  $\mu\text{L}$  del extracto previamente obtenido más 175  $\mu\text{L}$  de la solución FRAP y se midió la absorbancia a 595 nm. Los resultados son expresados en  $\mu\text{Mol}$  equivalentes de  $\text{Fe}_2\text{SO}_4$ /100 g de muestra fresca.

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Caracterización de la materia prima

Cada vez que se adquirió materia prima para el desarrollo experimental se le realizó la caracterización fisicoquímica (densidad, sólidos solubles, pH, acidez y humedad), térmica (capacidad calorífica y conductividad térmica), bioquímicas (ácido ascórbico y pectinmetilesterasa) y actividad antioxidante (fenoles totales, ABTS y FRAP). Estos valores se presentan en el Cuadro 6.

**Cuadro 6. Caracterización del puré de guayaba usado como materia prima.**

|                        | Parámetros   | Cuantificación |
|------------------------|--|----------------|
| Fisicoquímicas         | Acidez titulable (% ácido cítrico)                                     | 0.61±0.02      |
|                        | Densidad (kg/m <sup>3</sup> )  | 1045±0.5       |
|                        | Humedad (%)  | 87.79±0.3      |
|                        | pH   | 3.8±0.07       |
|                        | Sólidos solubles (°Bx)   | 11.86±0.12     |
| Térmicas               | Capacidad calorífica (J/kg°C)  | 3777.08±0.4    |
|                        | Conductividad térmica (W/m°C)  | 0.5808±0.004   |
| Bioquímicas            | Pectinmetilesterasa (UPME)   | 7.57±0.2       |
|                        | Ácido ascórbico (mg/100g de puré)                                      | 183.04±3.60    |
| Actividad antioxidante | Fenoles totales (mg equivalentes de ácido gálico/100 g muestra fresca) | 359.66±7.48    |
|                        | ABTS (µmol Eq. Trolox /g muestra fresca)                               | 43.17±0.17     |
|                        | FRAP (µmol Eq. FeSO <sub>4</sub> /g muestra fresca)                    | 96.80±0.10     |

---

---

De acuerdo al Cuadro 6, los resultados obtenidos de la cuantificación inicial de las muestras de puré de guayaba indican que las muestras en promedio tienen un contenido inicial de 183.04 mg/100 g en la pulpa en contenido de ácido ascórbico. Soares, *et al.*, (2007), reportan un valor de 168.36 mg/100 g de ácido ascórbico, para guayaba blanca, indicando que conforme aumenta su madurez tiende a disminuir la cantidad de vitamina C. De igual manera Quintanar (2008) menciona que la vitamina C es muy sensible a las reacciones de oxidación, destruyéndose con gran facilidad durante el procesamiento de alimentos, tanto en tratamientos térmicos como en aquellos que se someten a refrigeración o congelación.

Los valores de la actividad antioxidante por ambos ensayos muestran una correlación positiva entre las cantidades de vitamina C y la actividad antioxidante en el puré de guayaba. Sin embargo diversos estudios han demostrado que esta actividad antioxidante no solo es atribuible a esta vitamina, sino a otros fitoquímicos como fenoles, tioles, carotenoides, o tocoferoles presentes en la fruta (Sun *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2003).

En promedio el valor obtenido por el ensayo ABTS fue de  $43.17 \pm 0.17$   $\mu\text{mol Eq. Trolox /g}$  muestra fresca, mientras que por el de FRAP fue de  $96.80 \pm 0.10$   $\mu\text{mol Eq. FeSO}_4/\text{g}$  muestra fresca. Se ha indicado que ambas técnicas, ABTS y FRAP, son adecuadas para medir la actividad antioxidante de frutas y hortalizas y que los antioxidantes contenidos en este tipo de muestras tienen diferente reactividad frente a los dos ensayos (Jiménez *et al.*, 2001; Bashir *et al.*, 2003).

Aunque ambas técnicas, ABTS y FRAP basan su método en reacciones de tipo redox, con potencial redox similares, las diferencias en las respuestas ante las dos técnicas pueden radicar en el pH de trabajo, en ABTS se trabaja a pH neutro en tanto que en FRAP se trabaja a pH 3,6 por lo que se disminuye el potencial de ionización involucrado en la transferencia de electrones, con lo que se incrementa el potencial redox y finalmente se cambia el mecanismo de reacción dominante.

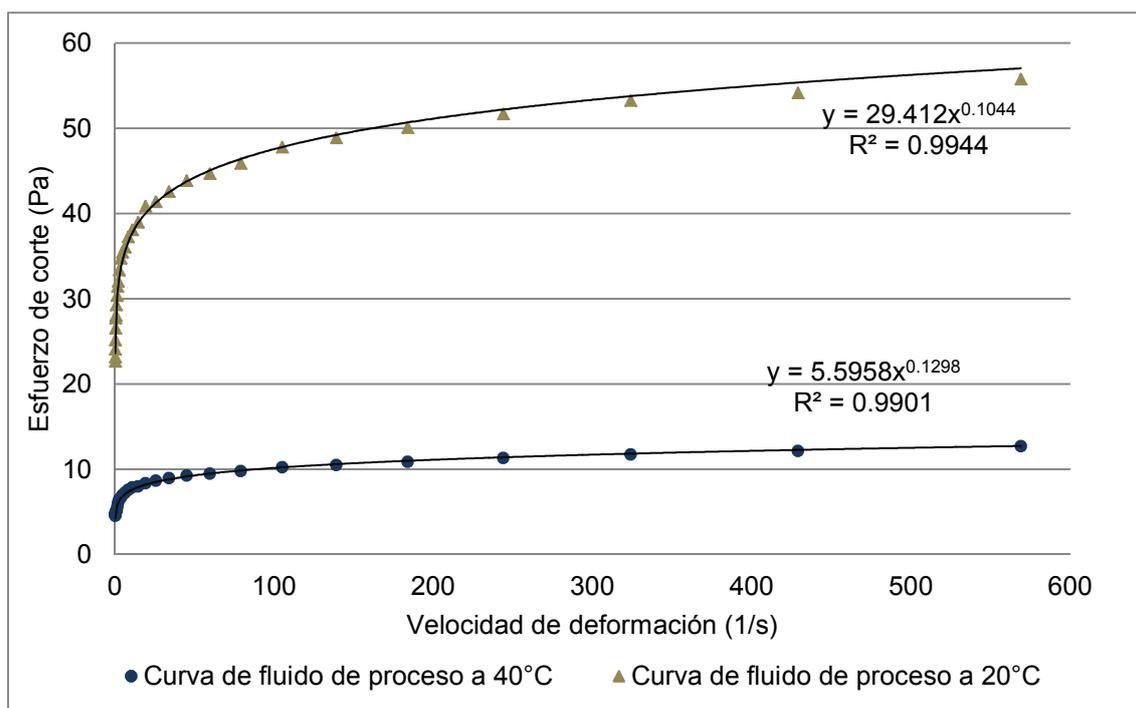
Además, el mecanismo de reacción en FRAP es por transferencia de electrones en tanto que en ABTS es tanto por transferencia de electrones como por transferencia de átomos de H (Prior *et al.*, 2005).

Es importante resaltar que algunos parámetros de la caracterización de la materia prima (humedad, densidad, capacidad calorífica, conductividad térmica) son necesarios para determinar los coeficientes internos de transferencia calor teóricos mediante la Ecuación (1) de Skelland *et al.*, (1962) y así compararlos con los obtenidos experimentalmente, con la finalidad de evaluar y establecer el porcentaje de diferencia entre ambos coeficientes. En el ICSR se han llevado a cabo diversos trabajos (Flores, 2005; Llano, 2007; Quintanar, 2008, Pascual, 2011) evaluando la transferencia de calor, sin embargo en todos ellos se han obtenido diferencias muy altas al comparar los coeficientes teóricos con los experimentales.

Por lo tanto en este trabajo se optó por determinar la viscosidad a dos temperaturas como se explicó en el apartado 4.5.10., y mediante el análisis de la funcionalidad de la viscosidad con la temperatura se logró establecer una ecuación la cual permitió conocer la viscosidad a la temperatura promedio que alcanzó el fluido de proceso en cada una de las corridas experimentales.

## **6.2. Evaluación de la viscosidad en puré de guayaba.**

La determinación de la viscosidad del puré se realizó a 20 y 40 °C, los datos obtenidos se presentan en el Anexo 1 y 2, respectivamente. En la Figura 13 se presentan las gráficas evaluadas a las dos temperaturas, de donde se puede observar un comportamiento de un fluido no Newtoniano independiente del tiempo, del tipo pseudoplástico. Resultados similares obtuvieron Andrade *et al.*, (2009), reportando que este comportamiento es típico para las pulpas de frutas, como mango, guayaba y cereza de las indias.



**Figura 13. Comportamiento pseudoplástico del puré de guayaba.**

Al analizar el comportamiento pseudoplástico del puré de guayaba mediante el modelo de la ley potencia ó de Ostwald de Waele (Ecuación 4) se obtienen los valores de  $k$  y  $n$ , estos datos permiten obtener la viscosidad efectiva del fluido como se indica en la sección 2.3.2 y Ec. 8. Por lo tanto se tiene un valor de ( $k = 29.412$  y  $n = 0.1044$  a  $20\text{ °C}$ ) y ( $k = 5.5958$  y  $n = 0.1298$  a  $40\text{ °C}$ ). El índice de consistencia ( $k'$ ) da una idea de la consistencia del producto y ( $n'$ ) la desviación del comportamiento del fluido respecto al Newtoniano.

Este tipo de fluidos se caracterizan por que la viscosidad aparente depende en gran medida de la temperatura, la composición del fluido, el esfuerzo de corte y de la velocidad de deformación. Es decir, la viscosidad aparente del fluido pseudoplástico disminuye a medida que aumenta el gradiente de velocidad, esto es son menos espesos cuando se someten a altas velocidades de deformación que cuando se cizalla lentamente; este comportamiento indica una ruptura o reorganización continua de la estructura, dando como resultado una menor resistencia al flujo (Carcamo, 2005).

De igual manera, (Alvarado y Aguilera, 2001; Matos y Aguilar, 2010) mencionan que la mayoría de los fluidos alimentarios son no-newtonianos presentando un comportamiento pseudoplástico, como por ejemplo; los jugos concentrados, purés, pulpa de frutas y vegetales, entre otros.

Al respecto Cabral et al., (2007), al evaluar el efecto de la viscosidad aparente en pulpa de guayaba a 38.5, 50, 60.4 y 72.4 °C obtuvieron que al aumentar la temperatura el esfuerzo de corte tiende a disminuir, debido a la naturaleza y composición de la pulpa. Sin embargo en este tipo de muestras suelen interactuar otros factores tales como la concentración de sólidos solubles (°Bx).

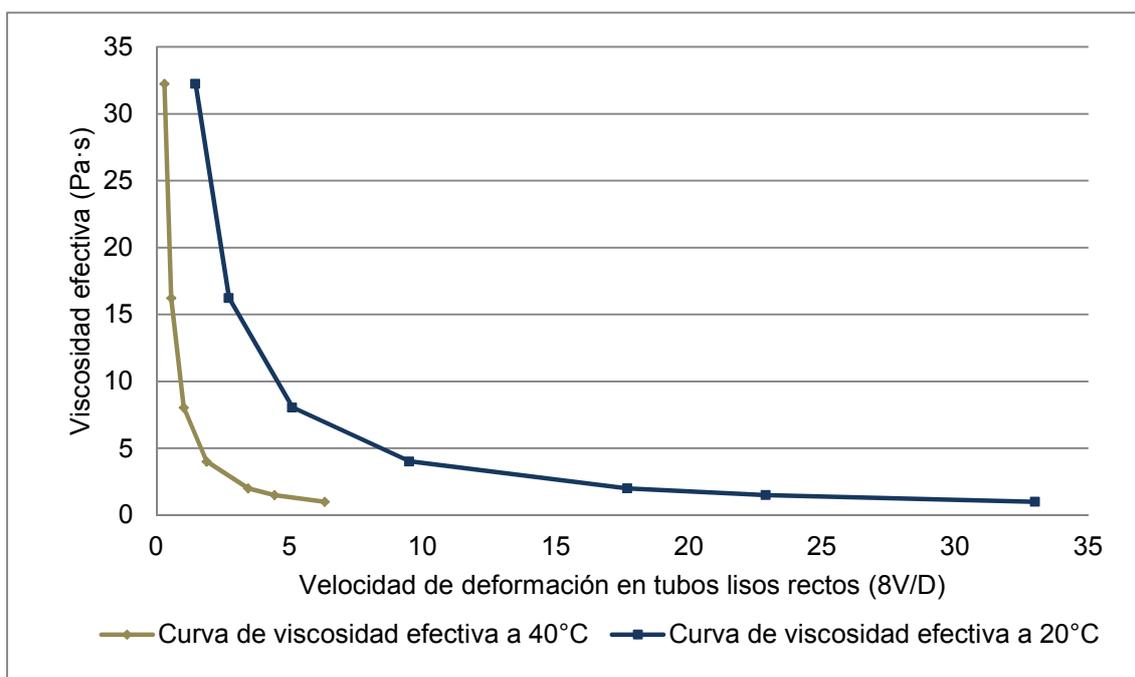
En el Cuadro 7 se presentan los resultados de la viscosidad efectiva ( $\mu_e$ ) que se encontró para cada uno de los flujos manejados.

**Cuadro 7. Valores de viscosidad efectiva a 20°C y 40°C para cada velocidad de flujo que se manejó en el ICSR.**

| Flujo<br>(mL/min) | Velocidad de<br>flujo (m/s) | Viscosidad efectiva ( $\mu_e$ ) en<br>Pa·s |      | *8V/D  |
|-------------------|-----------------------------|--|------|--------|
|                   |                             | 20°C                                       | 40°C |        |
| 200               | 0.002708                    | 33.00                                      | 6.33 | 1.0046 |
| 300               | 0.004062                    | 22.89                                      | 4.43 | 1.5114 |
| 400               | 0.005416                    | 17.69                                      | 3.45 | 2.0152 |

\*8V/D: Velocidad de deformación en tubos lisos rectos.

Con los datos de viscosidad efectiva se puede comprobar el comportamiento pseudoplástico al construir la gráfica que relaciona la viscosidad efectiva con la velocidad de deformación en tubos lisos 8V/D (Ecuación 8), como se muestra en la Figura 14.



**Figura 14. Viscosidad efectiva vs 8V/D a 20 y 40 °C.**

De la Figura 14, se observa que el fluido tiende a disminuir su viscosidad conforme aumenta la velocidad con que se transporta o se da el mezclado dentro del ICSR.

Una vez que se obtuvieron los valores de la viscosidad efectiva, se estableció una relación de ecuaciones del tipo Arrhenius (Ec. 28 y 29) para poder obtener la viscosidad mediante una corrección por temperatura, por lo tanto se tiene:

$$\mu_1 = \mu_0 \cdot e^{\frac{E_0}{RT_1}} \quad (28)$$

$$\mu_2 = \mu_0 \cdot e^{\frac{E_0}{RT_2}} \quad (29)$$

Conociendo  $\mu_1$  y  $\mu_2$  a cada valor de 8V/D, se relacionan ambas ecuaciones, obteniendo la Ec. (30).

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = e^{\frac{E_0}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (30)$$

Aplicando logaritmos naturales a la Ecuación 30 se tiene:

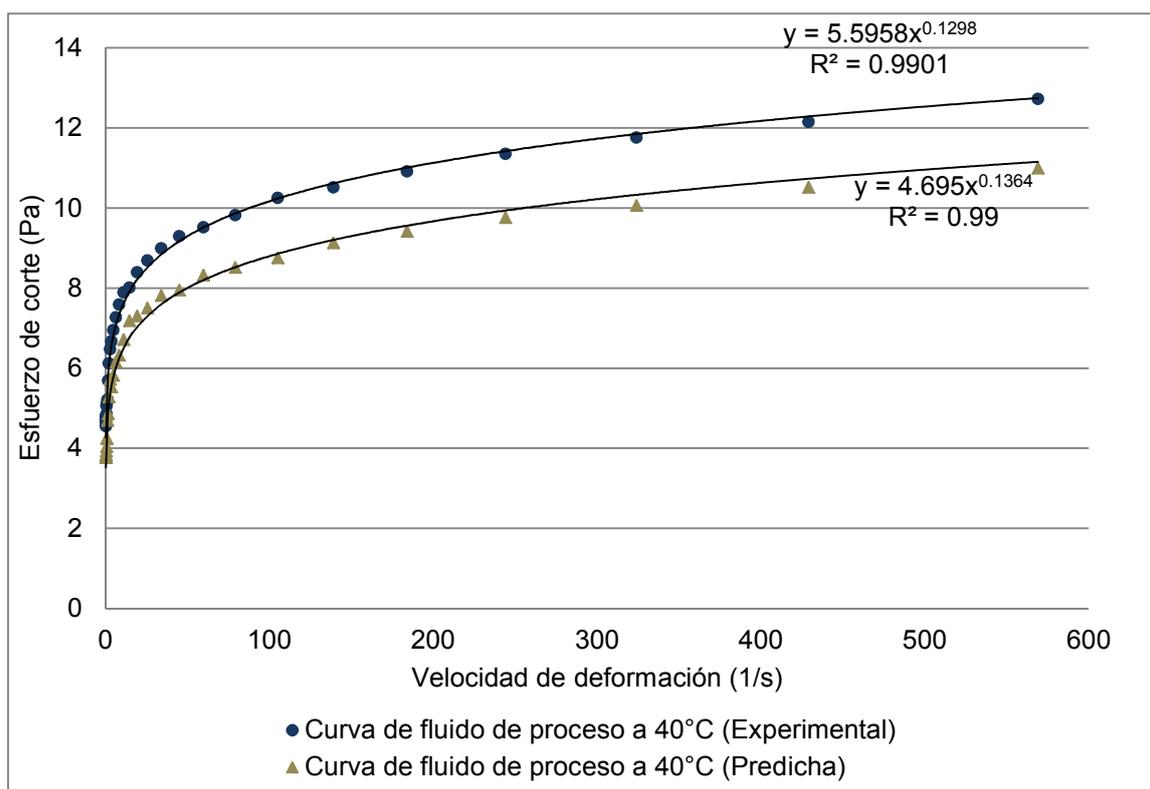
$$\ln \mu_1 - \ln \mu_2 = \frac{E_0}{RT_1} - \frac{E_0}{RT_2} = \frac{E_0}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (31)$$

Finalmente, despejando a  $E_0$  queda:

$$E_0 = \frac{\ln \mu_1 - \ln \mu_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \cdot (R) \quad (32)$$

Una vez que se conoce el valor de la energía de activación ( $E_0$ ), definida en la sección 2.2.3, se sustituye en la Ecuación 30, considerando como referencia alguna de las dos viscosidades ( $\mu_1$  ó  $\mu_2$ ) y temperaturas (20 ó 40 °C) calculadas previamente, con esta ecuación se podrá calcular la ( $\mu$ ) a la temperatura promedio que haya alcanzado el fluido durante el tratamiento térmico en cualquier condición de operación.

Para comprobar la aplicación de la ecuación obtenida, se calcularon las viscosidades que se obtendrían a 40 °C a partir de la Ec. (30) y se comprobaron con las experimentalmente obtenidas, obteniendo los resultados mostrados en la Figura 15.



**Figura 15. Curvas del fluido de proceso a 40°C (Experimental y Predicha).**

De acuerdo a la Figura 15, se observa que a partir de los datos experimentales y teóricos, se puede establecer que el efecto de la temperatura en el comportamiento reológico del flujo del puré de guayaba fue perfectamente descrito mediante la relación de ecuaciones del tipo Arrhenius (Ecuación 30), obteniendo un ajuste satisfactorio ( $R^2 = 0.99$ ) para determinar la variación de la viscosidad ( $\mu$ ), parámetro indispensable para la determinación de los coeficientes internos de transferencia de calor teóricos.

**6.3. Coeficientes internos de transferencia de calor experimental y teóricos.**

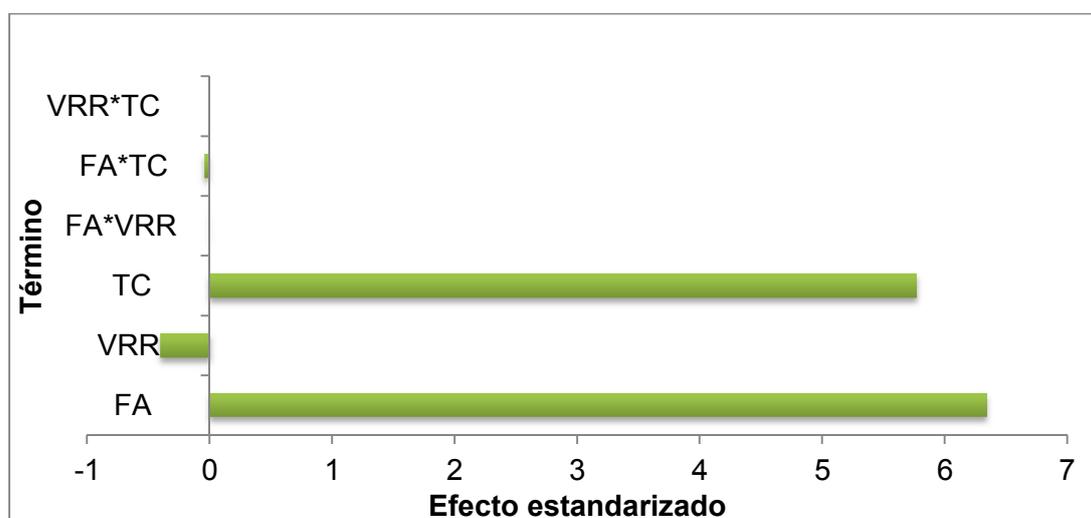
El valor del coeficiente de transferencia de calor para cada uno de los cuerpos del intercambiador de calor (zona de calentamiento, pre-enfriamiento y enfriamiento) determinados tanto experimentalmente (los cuales se calcularon en el Anexo 3), como a través de la ecuación de Skelland (calculados en el Anexo 4), se presentan en el Cuadro 8 para cada una de las condiciones de operación utilizadas en este trabajo.

**Cuadro 8. Coeficientes de transferencia de calor vs teóricos.**

| Tratamiento | FA(mL/min) | VRR(rpm) | TC(°C) | Coeficientes de transferencia de calor vs teóricos |         |                 |         |              |         |
|-------------|------------|----------|--------|--|---------|-----------------|---------|--------------|---------|
|             |            |          |        | Calentamiento                                      |         | Preenfriamiento |         | Enfriamiento |         |
|             |            |          |        | Experimental                                       | Teórico | Experimental    | Teórico | Experimental | Teórico |
| 1           | 200        | 100      | 145    | 316.84   | 404.82  | 191.74          | 215.25  | 342.92       | 429.37  |
| 2           | 400        | 100      | 145    | 433.43   | 513.05  | 186.71          | 231.77  | 718.67       | 752.73  |
| 3           | 200        | 500      | 145    | 273.61   | 429.99  | 206.03          | 241.99  | 360.38       | 471.53  |
| 4           | 400        | 500      | 145    | 383.70   | 547.87  | 237.63          | 366.28  | 660.02       | 754.35  |
| 5           | 200        | 100      | 155    | 304.99   | 406.75  | 173.22          | 216.79  | 340.02       | 431.90  |
| 6           | 400        | 100      | 155    | 349.86   | 512.44  | 244.57          | 330.01  | 611.10       | 758.13  |
| 7           | 200        | 500      | 155    | 300.72   | 434.44  | 174.38          | 242.31  | 324.40       | 473.38  |
| 8           | 400        | 500      | 155    | 369.57   | 546.34  | 239.69          | 366.60  | 666.93       | 755.24  |
| 9           | 300        | 300      | 150    | 378.95   | 508.43  | 186.66          | 227.24  | 495.24       | 526.90  |
| 10          | 300        | 300      | 150    | 371.11   | 507.85  | 189.55          | 227.24  | 497.39       | 527.36  |
| 11          | 300        | 300      | 150    | 374.40   | 508.46  | 190.10          | 227.45  | 491.96       | 526.36  |

FA: Flujo de alimentación, VRR: Velocidad de rotación de raspadores, TC: Temperatura de calentamiento

De acuerdo al Cuadro 8, y relacionando cada una de las condiciones manejadas se observa que los tratamientos con mayores coeficientes internos de transferencia de calor experimentales y teóricos en la etapa de calentamiento fueron el 2, 4 y 8. Al realizar el análisis estadístico (Anexo 6) se tiene que en todos ellos el flujo de alimentación (FA) fue el mismo (400 mL/min) y esta variable fue la que ejerció mayor influencia sobre el aumento en los coeficientes de transferencia de calor (Figura 16).



FA: Flujo de alimentación, VRR: Velocidad de rotación de raspadores, TC: Temperatura de calentamiento.

**Figura 16. Gráfica de Pareto ( $\alpha=0.05$ ) para la evaluación de los coeficientes de transferencia de calor experimentales en la etapa de calentamiento durante el tratamiento térmico de puré de guayaba.**

Cuando se analiza el factor velocidad de rotación de raspadores (VRR), se observó que en la mayoría de los tratamientos fue la misma (500 rpm), a excepción del tratamiento 2. Mientras que al evaluar el efecto de la temperatura de calentamiento (TC) se observó que en los tratamientos (2 y 4) fue la misma (145°C), en contraste para el tratamiento (8) la temperatura fue de (155°C). Al analizar los tratamientos 5 y 6, se observó que aumentando el flujo en una relación de 1 a 2, es decir, de 200 a 400 mL/min, se favorece el aumento en los coeficientes de transferencia de calor para las tres etapas.

Por otro lado, se observa que los coeficientes teóricos fueron mayores respecto a los experimentales, este efecto pudiera deberse a que al calcular los coeficientes teóricos mediante la Ec. de Skelland se consideran las propiedades reológicas y térmicas del puré de guayaba, mientras que con los coeficientes experimentales solo se emplean las temperaturas alcanzadas durante el tratamiento térmico. Además que al calcular los coeficientes teóricos no se consideró el efecto de las placas raspadoras durante la determinación de la viscosidad.

Por lo tanto, de acuerdo a los resultados se establece que a velocidades de rotación y flujos altos, se da una mayor turbulencia contribuyendo a una mejor transferencia de calor.

En el mismo Cuadro (8), se observa que al comparar los coeficientes experimentales en las tres etapas, la de enfriamiento presenta los valores más altos en todos los tratamientos, esto debido a que el diferencial de temperatura que existe en la etapa de calentamiento es mayor que en la de enfriamiento (Figura 17), por lo que al dividir el calor transferido, da como resultado menores coeficientes para la etapa de calentamiento y mayores para el de enfriamiento de acuerdo a la Ecuación 21.

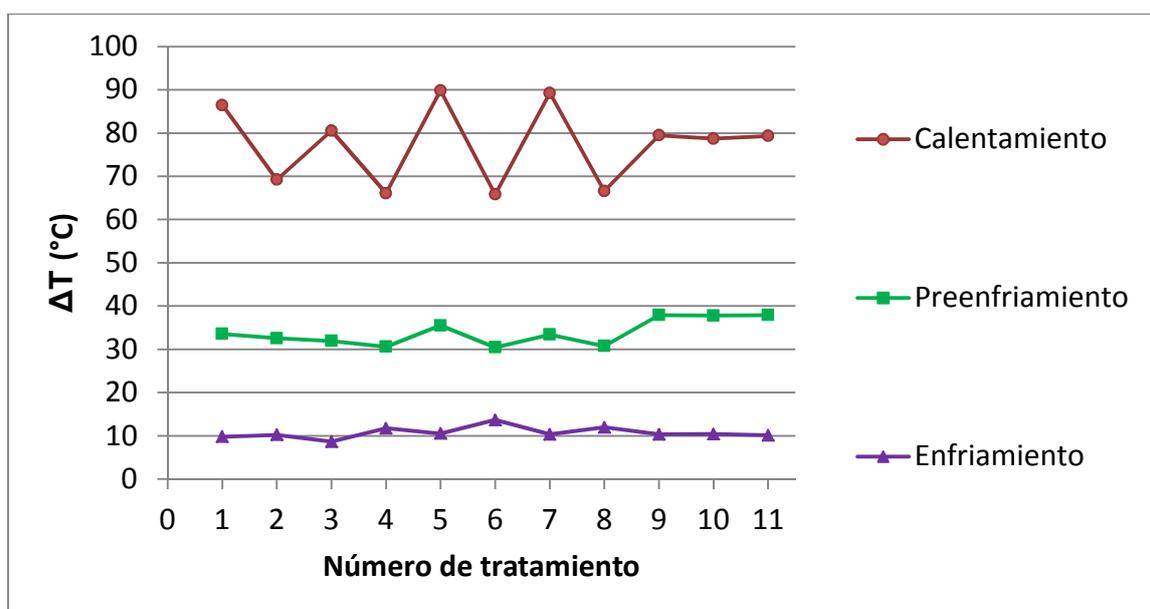


Figura 17. Diferencia de la temperatura durante el tratamiento térmico.

En la Ecuación 33, se presenta el polinomio de respuesta para el coeficiente interno de transferencia de calor experimental para la etapa de calentamiento.

Donde se observa que los factores que tuvieron mayor influencia fueron el flujo de alimentación, temperatura de calentamiento y la interacción velocidad de rotación de raspadores y temperatura de calentamiento, coincidiendo con lo presentado en la Figura 16.

$$h_{e1} = -627.82 + 6.34FA - 0.39VRR + 5.77TC - 0.005FA*VRR - 0.03FA*TC + 0.002VRR*TC \quad (33)$$

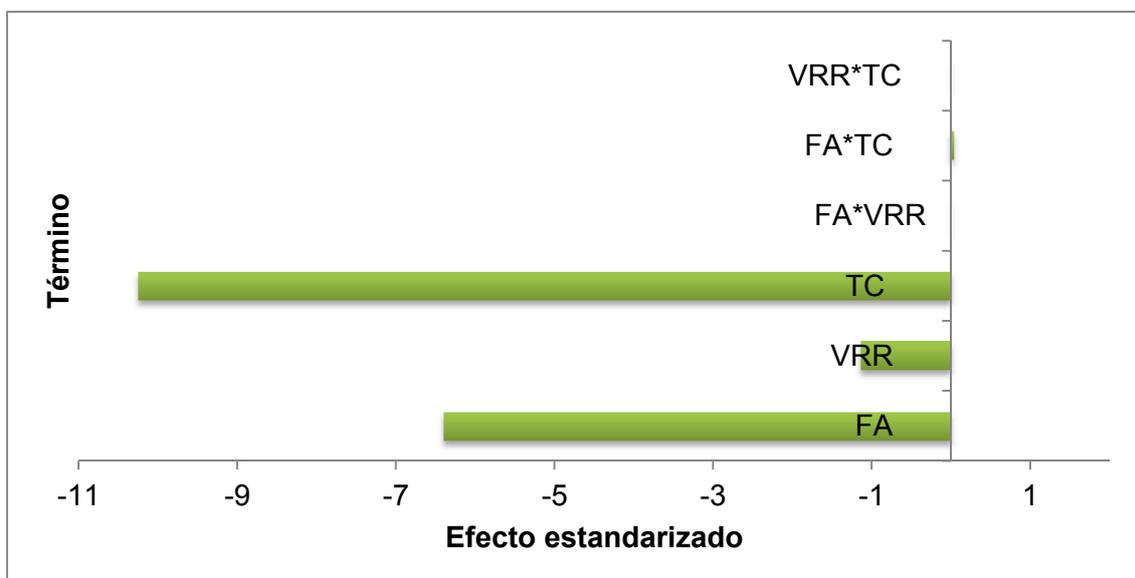
Por otro lado, los factores velocidad de rotación y las interacciones flujo y velocidad de rotación, flujo y temperatura, velocidad de rotación y temperatura ejercieron un efecto negativo (signo (-) en el polinomio de respuesta) sobre los coeficientes experimentales para la etapa de calentamiento. Es decir, contribuyeron en la disminución de estos valores. Al respecto, las temperaturas de calentamiento manejadas durante esta etapa oscilaron entre 145 y 155 °C, utilizando como medio de calentamiento aceite mineral.

Posteriormente para la etapa de pre-enfriamiento y a partir del análisis estadístico (Anexo 7) se elaboró el polinomio de respuesta (Ecuación 34).

$$h_{e2} = 1685.76 - 6.38FA - 1.12VRR + 10.23TC + 0.008FA*VRR + 0.04FA*TC + 0.007VRR*TC \quad (34)$$

De acuerdo a la Ec. (34), se observa que el factor que tuvo mayor influencia en la variable respuesta, fue el flujo de alimentación y la interacción flujo y temperatura. Adicionalmente, es importante destacar que los factores velocidad de rotación y temperatura de calentamiento ejercieron un efecto negativo (signo (-) en el polinomio de respuesta) sobre los coeficientes para la etapa de pre-enfriamiento, es decir, favorecen a que en esta etapa los coeficientes fueran los más bajos en comparación con la etapa de calentamiento y pre-enfriamiento.

Así mismo, el medio de pre-enfriamiento utilizado fue agua de la llave a temperatura constante ( $20 \pm 1$  °C), con lo cual se obtuvo el diferencial de temperatura menor al llevar a cabo el tratamiento térmico en las tres etapas. Esto se puede apreciar de mejor manera en la Figura 18.



FA: Flujo de alimentación, VRR: Velocidad de rotación de raspadores, TC: Temperatura de calentamiento.

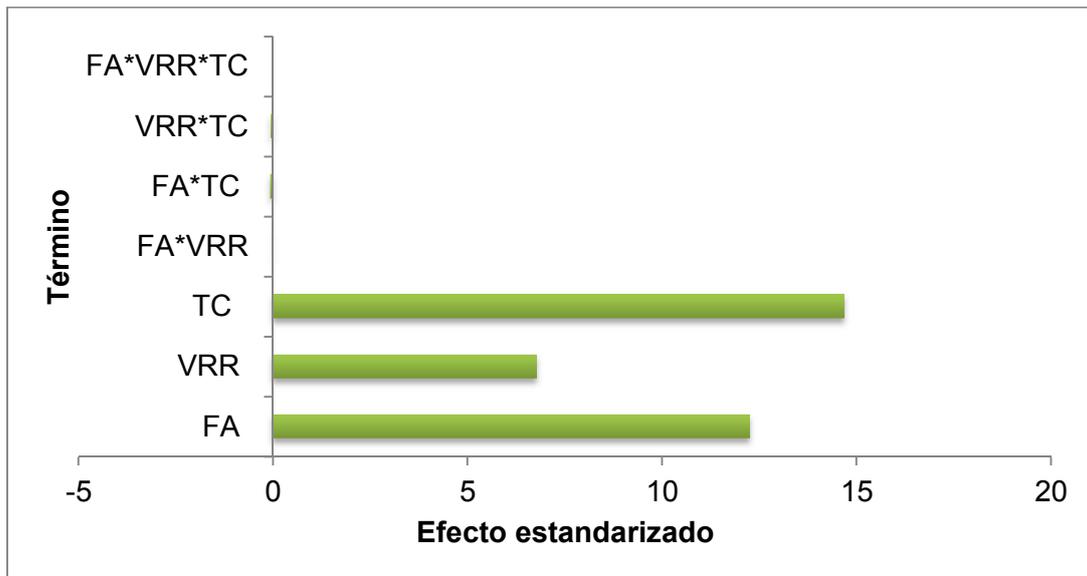
**Figura 18. Gráfica de Pareto ( $\alpha=0.05$ ) para la evaluación de los coeficientes de transferencia de calor experimentales en la etapa de pre-enfriamiento durante el tratamiento térmico de puré de guayaba.**

Respecto a los coeficientes con mejor transferencia de calor para esta etapa fueron el 6 y 8, en los cuales varió la velocidad de rotación de 100 a 500 rpm con un flujo constante de 400 mL/min.

Finalmente, en función del análisis estadístico (Anexo 8) se presenta el polinomio de respuesta para el coeficiente experimental en la etapa de enfriamiento (Ecuación 35).

$$h_{e3} = -2186.63 + 12.23FA + 6.78VRR + 14.69TC - 0.02FA*VRR - 0.07FA*TC - 0.04VRR*TC \quad (35)$$

De acuerdo a la Ec. (35) y la Figura 19, se observa que el flujo de alimentación y la temperatura de calentamiento son los principales factores que contribuyen al aumento de este coeficiente, mientras que el factor secundario fue la velocidad de rotación.



FA: Flujo de alimentación, VRR: Velocidad de rotación de raspadores, TC: Temperatura de calentamiento.

**Figura 19. Gráfica de Pareto ( $\alpha=0.05$ ) para la evaluación de los coeficientes de transferencia de calor experimentales en la etapa de enfriamiento durante el tratamiento térmico de puré de guayaba.**

De igual manera, en esta etapa se presentó un efecto negativo (signo (-) en el polinomio de respuesta) sobre los coeficientes de transferencia de calor. Principalmente este efecto se observa en la interacción flujo y velocidad de rotación, flujo y temperatura y velocidad de rotación y temperatura.

Respecto a la temperatura para la etapa de enfriamiento fue de  $10 \pm 0.5$  °C, empleando etilenglicol como medio de refrigerante. Además como se mencionó en la Figura 17, fue en esta etapa donde se determinaron los coeficientes más altos.

Por lo tanto, de acuerdo a los análisis anteriores se establece que los mejores coeficientes experimentales y teóricos durante el tratamiento térmico de puré de guayaba se obtienen cuando se trabaja a flujos y velocidades de rotación altas (400 mL/min y 500 rpm, respectivamente) esto debido a que a velocidades de rotación elevadas se promueve un mejor mezclado y homogenización del producto, evitando así sobrecalentamiento localizados mediante el uso de dos filas de unidades de raspado.

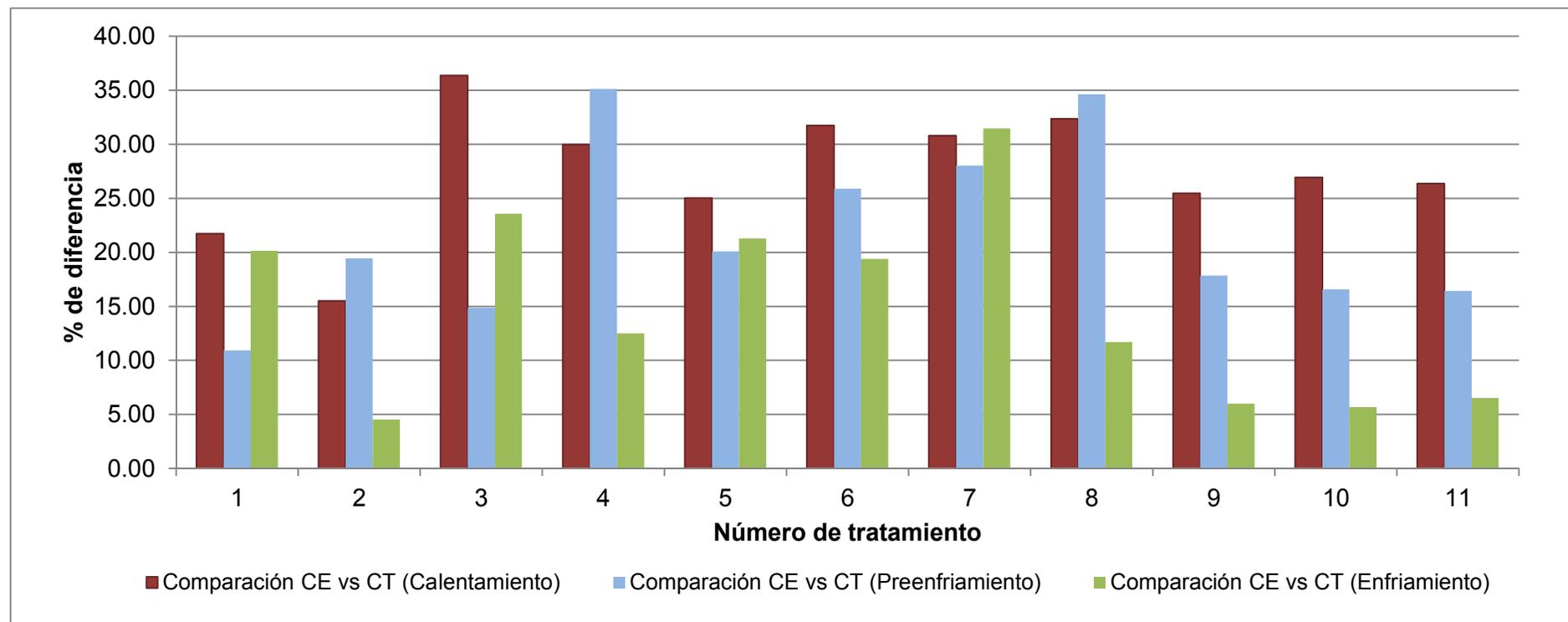
Pascual (2011), menciona que los mejores coeficientes experimentales se obtienen a velocidades de rotación de 300 rpm, resultado que es mejorado con el raspador de doble filas de unidades de raspado.

De igual manera, Quintanar (2008) determinó que los coeficientes de transferencia de calor aumentan a mayor flujo y velocidad de rotación, debido a que el fluido tiene más movimiento y los raspadores no permiten que se adhiera el puré en la superficie del área de transferencia.

Por otro lado, para detallar el ajuste de la Ec. de Skelland, en el siguiente apartado se presenta el porcentaje de diferencia entre los coeficientes experimentales y teóricos para cada etapa del ICSR.

#### 6.4. Evaluación de coeficientes de transferencia de calor experimental vs teórico.

A partir de los coeficientes de transferencia de calor experimental y teóricos (Cuadro 8), y con la finalidad de evaluar ambos coeficientes se construyó la gráfica que relaciona los porcentajes de diferencia para cada una de las etapas durante el tratamiento en el ICSR, estas diferencias se presentan en la Figura 20.



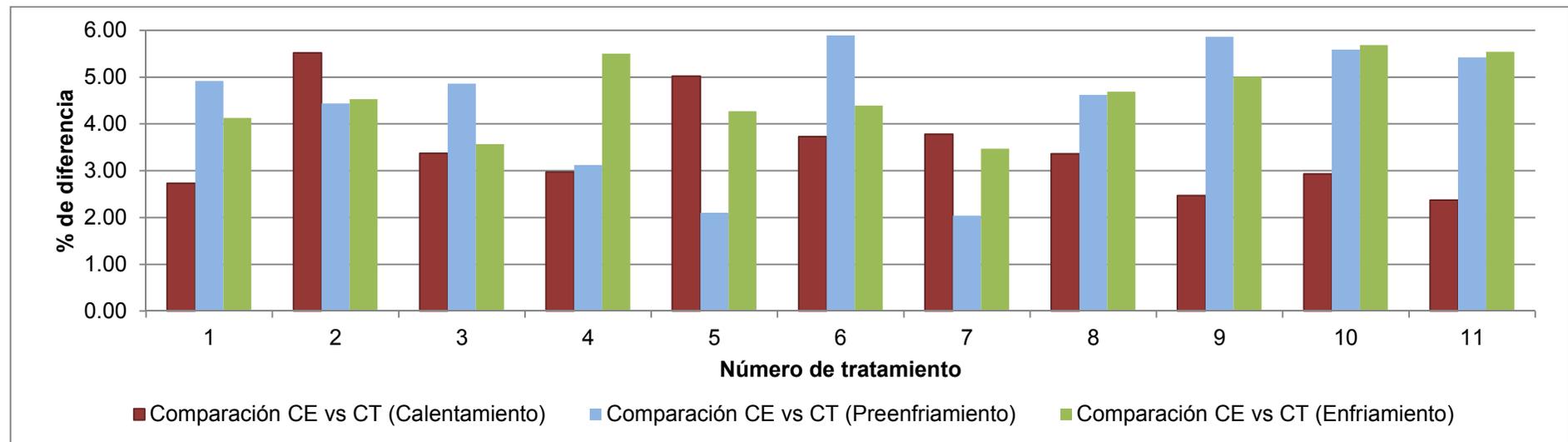
CE: Coeficiente interno de transferencia de calor experimental  
 CT: Coeficiente interno de transferencia de calor teórico

**Figura 20. Porcentaje de diferencia entre los coeficientes experimentales y teóricos.**

En la Figura 20 se observa que el porcentaje de diferencia en todos los tratamientos fue en promedio del 21%, sin embargo este valor se considera muy alto, lo cual pudiera atribuirse a que no se está tomando en cuenta el efecto de la velocidad de rotación de los raspadores al evaluar la viscosidad, es decir, a velocidades de rotación más altas el puré de guayaba tiende a disminuir su viscosidad y consecuentemente los valores de los coeficientes teóricos son más altos de lo que deberían ser, ocasionando una mayor diferencia al compararlos con los coeficientes experimentales. De igual manera, se observó que en los tratamientos 2, 9, 10 y 11 presentaron el menor porcentaje de diferencia (6%) para la etapa de enfriamiento, indicando que para estos tratamientos el ajuste de la Ecuación de Skelland fue más aceptable. Al respecto, Pascual (2011), evaluó los coeficientes experimentales y teóricos, reportando valores con un alto porcentaje de diferencia (70%), resaltando que al determinar estos valores no se consideró la temperatura promedio del fluido, provocando considerables diferencias entre ambos coeficientes. Llano (2005) al evaluar la transferencia de calor en puré de zanahoria, menciona que el parámetro que influye en estas diferencias de forma significativa es la viscosidad del fluido. De ahí que los porcentajes de diferencia tiendan a ser elevados.

Por otro lado, Quintanar (2008), encontró que la gran diferencia entre ambos coeficientes, se debe a que en los coeficientes experimentales se toman en cuenta las temperaturas de entrada y salida del puré y del refrigerante, así como el flujo y velocidad de rotación, mientras que para la determinación de coeficientes teóricos se toman en cuenta las propiedades térmicas y fisicoquímicas (capacidad calorífica, conductividad térmica, viscosidad y densidad), así como el flujo y la velocidad de rotación. Como se indicó anteriormente de acuerdo a los resultados obtenidos y evaluando la viscosidad a dos temperaturas (20 y 40 °C) se logró establecer una ecuación la cual permite obtener la viscosidad a la temperatura que se desee calcular el coeficiente de transferencia de calor teórico, generando así que la Ecuación de Skelland describa de formas más adecuada y se correlacione con los coeficientes de transferencia de calor experimentales.

De manera de comparar los coeficientes de transferencia de calor obtenidos en este estudio se incluyó el cálculo de estos valores considerando una menor viscosidad por efecto de las placas raspadoras, para lo cual se construyó la gráfica que relaciona los porcentajes de diferencia para cada una de las etapas durante el tratamiento en el ICSR, estas diferencias se presentan en la Figura 21. La forma de cómo se calcularon estos valores se presenta en el Anexo 13.



CE: Coeficiente interno de transferencia de calor experimental

CT: Coeficiente interno de transferencia de calor teórico

**Figura 22. Porcentaje de diferencia entre los coeficientes experimentales y teórico, considerando el efecto por las placas raspadoras.**

Se observa que el porcentaje de diferencia en todos los tratamientos fue en promedio del 4%, por lo que si se considera el efecto de las placas raspadoras, los coeficientes de transferencia de calor teóricos se aproximan más a los experimentales. Comprobando que la Ecuación de Skelland, la cual ha sido muy utilizada en fluidos newtonianos, describió de manera aceptable el comportamiento de fluidos no newtonianos como lo es el puré de guayaba.

### 6.5. Evaluación de las Curvas de Distribución de Tiempos de Residencia.

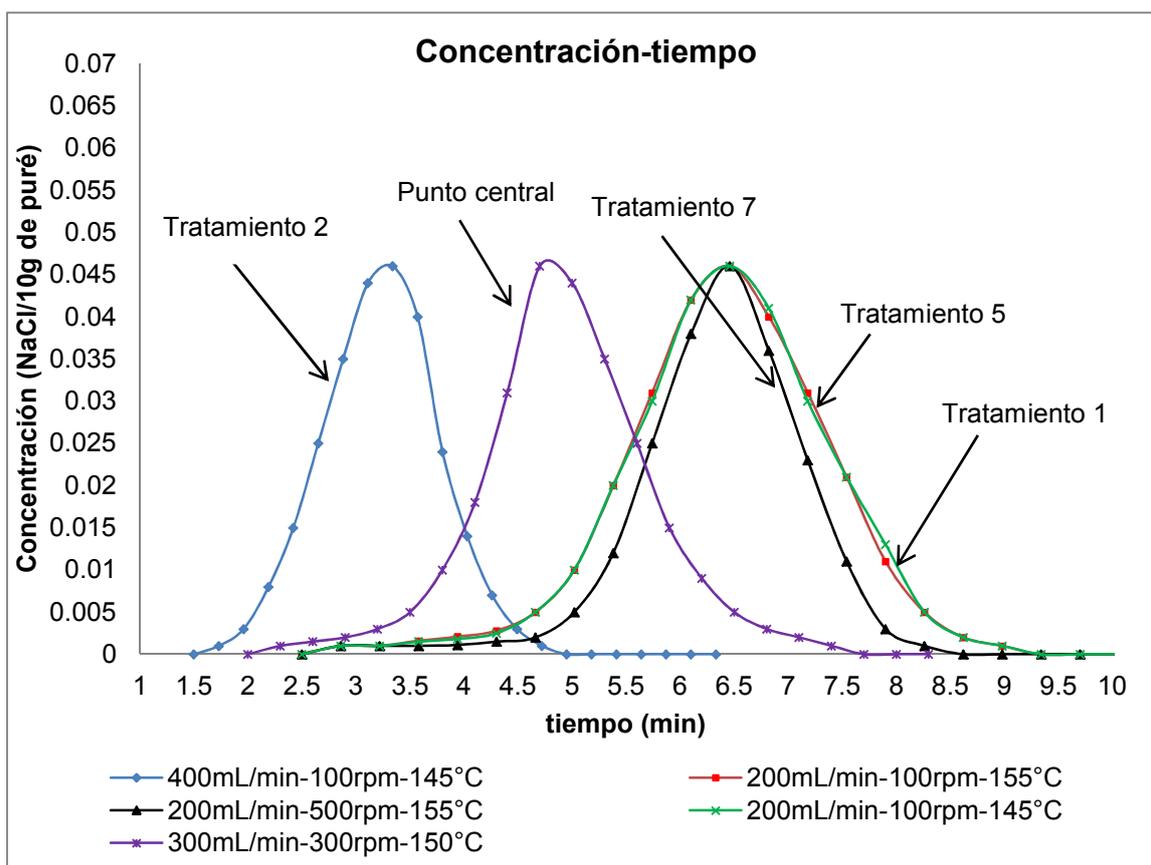
Para la determinación de las Curvas de Distribución de Tiempos de Residencia se seleccionaron 5 tratamientos con la finalidad de evaluar el efecto del flujo de alimentación (Tratamientos 1 y 2), velocidad de rotación de raspadores (Tratamientos 5 y 7) y temperatura del medio de calentamiento (Tratamientos 1 y 5) sobre la distribución de tiempos de residencia en el ICSR. Los tratamientos seleccionados se muestran en el Cuadro 9.

**Cuadro 9. Tratamientos evaluados para DTR durante el termoproceso de puré de guayaba.**

| Tratamiento | FA(mL/min) | VRR(rpm) | TC(°C) |
|-------------|------------|----------|--------|
| 1           | 200        | 100      | 145    |
| 2           | 400        | 100      | 145    |
| 5           | 200        | 100      | 155    |
| 7           | 200        | 500      | 155    |
| PC          | 300        | 300      | 150    |

FA= Flujo de alimentación; TC= Temperatura de calentamiento; VRR= Velocidad de rotación de raspadores PC: Punto central; condiciones manejadas en los tratamientos 9, 10 y 11

En la Figura 22 se puede observar que a medida que hubo un incremento en el flujo de alimentación (200 a 400 mL/min), disminuyó el tiempo de residencia. Mientras que al evaluar el efecto de la temperatura del medio de calentamiento, se observa que ambas curvas fueron muy similares, es decir, esta variable no ejerció efecto sobre la distribución de tiempos de residencia. Al incrementar la velocidad de rotación (100 a 500 rpm), se obtuvo una mejor uniformidad del trazador durante el tratamiento térmico, lo cual se reflejó en una curva más cerrada con menos dispersión (Tratamiento 7).



**Figura 22. Curva concentración vs tiempo de los tratamientos analizados durante el tratamiento térmico de puré de guayaba en el ICSR.**

A partir de los resultados de concentración se determinaron los tiempos promedio de residencia.

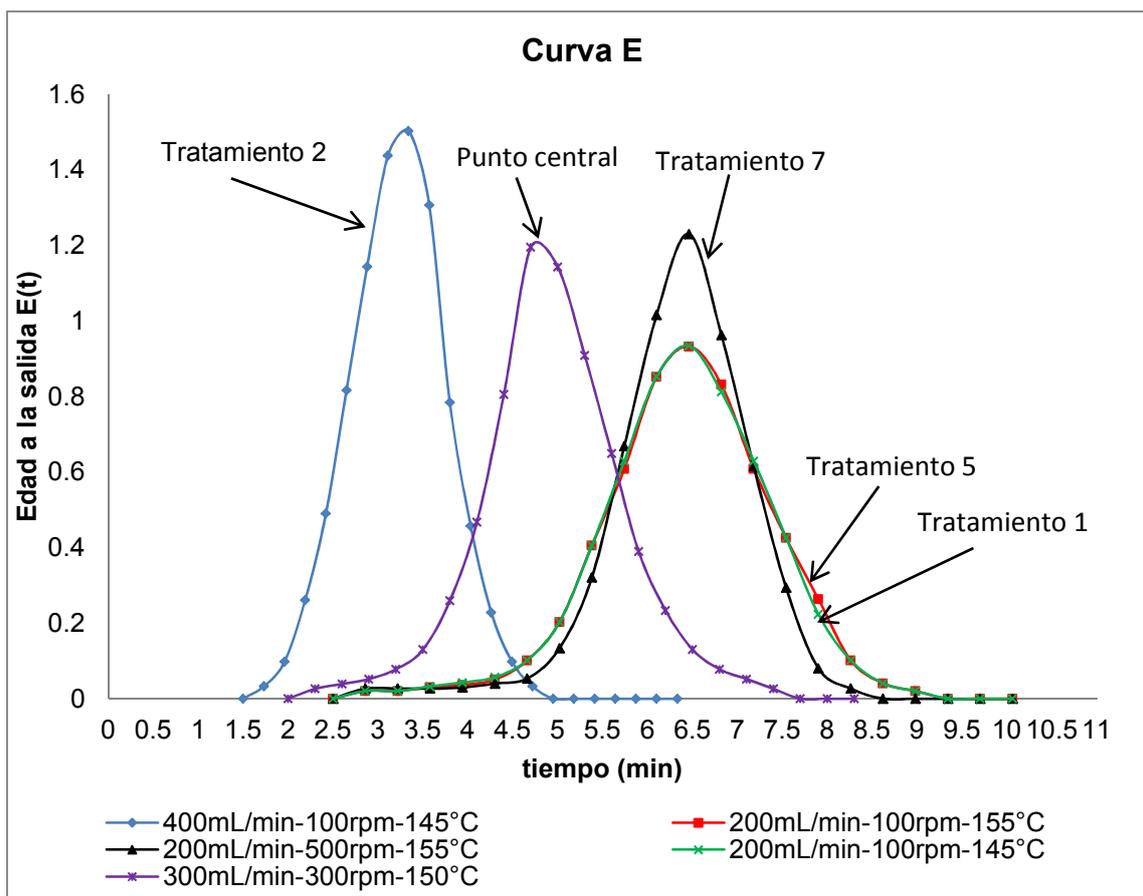
De acuerdo con Hennequin, Della Valle y Fayolle (1999), los tiempos promedio de residencia (*TPR*) teóricos se calculan considerando la siguiente relación.

$$TPR = \frac{\text{Volumen de carga del ICSR}}{\text{Flujo de alimentación}} \quad (36)$$

El tiempo de residencia teórico equivale al tiempo que permanecerán las partículas del producto en el ICSR, si se tratara de un flujo tapón. Los resultados obtenidos para cada *TPR* se presentan en el Cuadro 10.

Usando el método de trapecios se calculó el área bajo la curva de concentración-tiempo, para normalizar la curva y así obtener la curva E, dividiendo las concentraciones entre el área bajo la curva. Donde el área bajo

la curva es  $A = \Delta x \left( \frac{y_0}{2} + y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_{n-1} + \frac{y_n}{2} \right)$ , siendo  $\Delta x$  la diferencia de tiempo constante que existe entre las muestras tomadas y  $y_0, y_1, y_2, y_3 \dots y_n$ , el valor de las concentraciones de NaCl en cada una. Aplicando la Ecuación para el cálculo de la Curva E, se obtuvo la Figura 23.



**Figura 23. Curva E de los tratamientos analizados durante el tratamiento térmico de puré de guayaba en el ICSR.**

Finalmente aplicando la Ec. (14) para calcular el tiempo medio de residencia ( $T_m$ ), así como la amplitud de la distribución ( $\sigma^2$ ) obtenida mediante la Ec. (15) se obtuvieron los resultados que se presentan en el Cuadro 10.

**Cuadro 10. Condiciones de operación del puré de guayaba tratado en el ICSR.**

| Tratamiento | FA<br>(mL/min) | TC<br>(°C) | VRR<br>(rpm) | TPR<br>(min) | $t_m$<br>(min) | $\sigma^2$<br>(min <sup>2</sup> ) |
|-------------|----------------|------------|--------------|--------------|----------------|-----------------------------------|
| 1           | 200            | 145        | 100          | 2.562        | 6.408          | 0.894                             |
| 2           | 400            | 145        | 100          | 1.281        | 3.223          | 0.282                             |
| 5           | 200            | 155        | 100          | 2.562        | 6.426          | 0.891                             |
| 7           | 200            | 155        | 500          | 2.562        | 6.346          | 0.629                             |
| PC          | 300            | 150        | 300          | 1.708        | 4.942          | 0.631                             |

FA: Flujo de alimentación; TC: Temperatura de calentamiento; VRR: Velocidad de rotación de raspadores; TPR: Tiempo promedio de residencia teórico;  $T_m$ : Tiempo medio de residencia;  $\sigma^2$ : Amplitud de la dispersión; PC: Punto central; condiciones manejadas en los tratamientos 9, 10 y 11

De acuerdo a la Figura 24 y el Cuadro 10, se observa que para el tratamiento 2 (mayor flujo) presentó un menor tiempo de residencia (3.223 min). Sin embargo el tratamiento 1 y 5 (menor flujo y rpm) fueron los que presentaron una mayor dispersión del trazador de 0.894 y 0.891, respectivamente, ocasionando un ligero aumento en el tiempo de residencia medio que fue de 6.408 a 6.426.

De acuerdo a los valores del Cuadro 10 se observa que manteniendo un flujo de alimentación (200 mL/min) y solo variando la velocidad de rotación (100 a 500 rpm, tratamiento 5 y 7) se logra disminuir la varianza (0.891 a 0.629) indicando que a velocidades de rotación altas se alcanza una menor dispersión del trazador y la curva tiende a ser más uniforme acercándose al flujo tapón.

Por otro lado, al evaluar el efecto del flujo de alimentación (tratamiento 1 y 2), se tiene que al incrementarlo de 200 a 400 mL/min se encontró una mayor aproximación al flujo tapón ( $\sigma^2 = 0.282$ ). Esto es similar con los resultados obtenidos por Mabit *et al.*, (2008), al evaluar la DTR en un ICSR, utilizando como trazador una solución de 0.166 g de NaCl/g de solución, encontrando que el modelo de flujo tapón es perfectamente descrito a velocidades de rotación altas (360 rpm) combinándola con flujos altos (580 mL/min).

Al respecto, Abichandani y Samarma (1988) observaron que el flujo dentro del ICSR se aproxima al flujo tapón con el incremento del número de raspadores, la velocidad de los raspadores y la velocidad de flujo másico. Generando así una disminución en el tiempo de residencia, debido a que las partículas permanecen menos tiempo en el intercambiador de calor de superficie raspada.

Llano (2007) evaluó las curvas de DTR manteniendo un flujo constante de 250 mL/min, revelando que existe una mayor dispersión del trazador cuando la velocidad en los raspadores disminuye (100 rpm), es decir que la curva es más amplia, dando como resultado un ligero aumento en el tiempo de residencia medio de las partículas del puré en el ICSR a comparación del resultado con la velocidad de raspadores a 200rpm (4.11 min) en el cual se obtuvo un mejor mezclado dentro del cuerpo de intercambio de las partículas, y una menor dispersión del trazador.

De igual manera, Quintanar (2008), determino las curvas de DTR en un ICSR empleando puré de papaya como fluido de trabajo. Encontrando que al incrementar el flujo y la velocidad de rotación de raspadores se tiene un menor tiempo de residencia del puré en el ICSR, acercándose más al flujo tapón.

Relacionando los coeficientes de transferencia de calor con la distribución de tiempos de residencia se puede establecer que los coeficientes de transferencia de calor experimentales y teóricos más altos se obtienen cuando se trabaja a flujos y velocidades de rotación altas (400 mL/min y 500 rpm, respectivamente), provocando así que el puré permanezca el menor tiempo de residencia ( $T_m = 3.22$  min), reflejándose en la calidad del puré de guayaba, la cual se evaluó en el siguiente apartado.

## 6.6. Determinaciones bioquímicas y actividad antioxidante del puré de guayaba

### 6.6.1. Actividad residual de la enzima pectinmetilesterasa.

En la industria de los alimentos generalmente el tratamiento de la pulpa de guayaba se da a 90 °C durante 1 minuto, principalmente para alcanzar la inactivación de PME (Carabalí *et al.*, 2009).

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo (Figura 24) y relacionando con las temperaturas alcanzadas durante el tratamiento térmico (Cuadro 11) se observa que solo en los tratamientos 5 y 7 se logró la inactivación total de la enzima pectinmetilesterasa (*PME*), en estos las temperaturas promedio que alcanzo el puré dentro del intercambiador fueron de 89.8 y 89.2 °C, respectivamente.

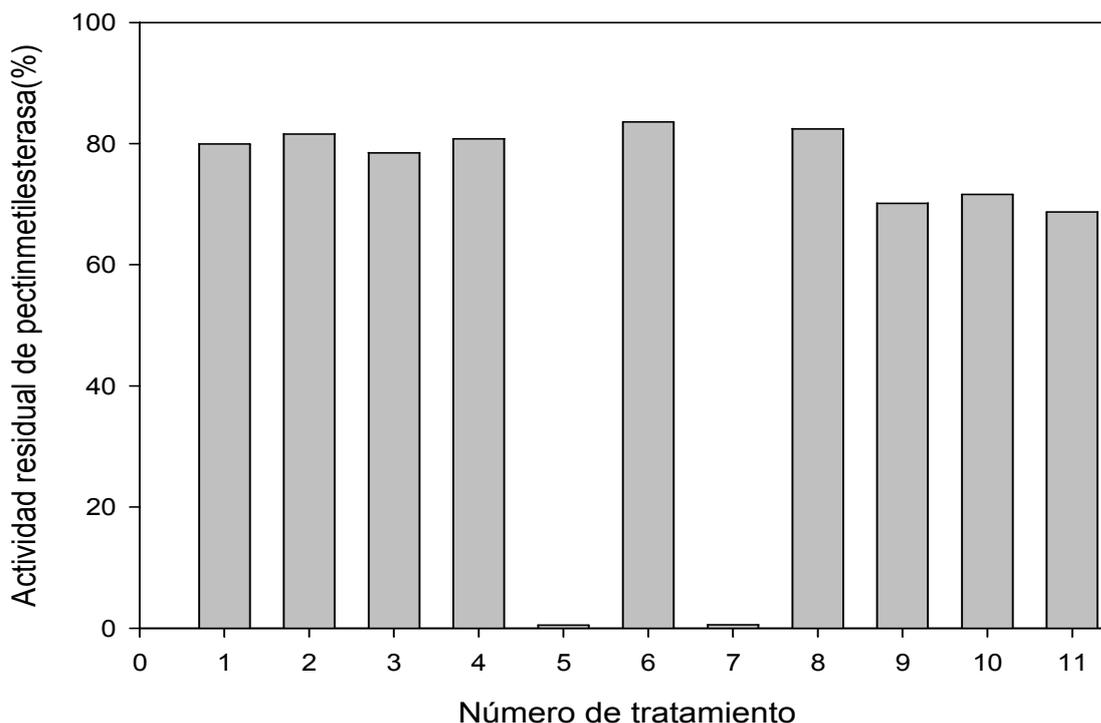
**Cuadro 11. Condiciones manejadas durante el procesamiento de puré de guayaba.**

| Tratamiento | FA<br>(mL/min) | VRR<br>(rpm) | TC<br>(°C) | T (°C) |
|-------------|----------------|--------------|------------|--------|
| 1           | 200            | 100          | 145        | 74.4   |
| 2           | 400            | 100          | 145        | 65.2   |
| 3           | 200            | 500          | 145        | 71.5   |
| 4           | 400            | 500          | 145        | 66.0   |
| 5           | 200            | 100          | 155        | 89.8   |
| 6           | 400            | 100          | 155        | 69.8   |
| 7           | 200            | 500          | 155        | 89.2   |
| 8           | 400            | 500          | 155        | 66.6   |
| 9           | 300            | 300          | 150        | 73.4   |
| 10          | 300            | 300          | 150        | 73.7   |
| 11          | 300            | 300          | 150        | 73.3   |

FA: Flujo de alimentación, VRR: Velocidad de rotación de raspadores, TC: Temperatura de calentamiento, T: Temperaturas alcanzadas durante el tratamiento térmico.

En contraste en el resto de los tratamientos las condiciones fueron ineficientes para la inactivación de la enzima. Sin embargo se ha observado que al evaluar la estabilidad de la PME durante el tratamiento térmico en pulpa de guayaba a temperaturas entre 75 y 85 °C esta enzima empieza a ser termolábil, mientras

que a temperaturas inferiores el efecto sobre esta variable no es significativo (Da Silva *et al.*, 2006). Pascual (2011), obtuvo resultados similares al evaluar el tratamiento térmico de puré de mango, reportando que durante el procesamiento térmico deben evitarse flujos altos, ya que se ocasiona que el puré permanezca con bajas temperaturas y la enzima no se inactive por completo.



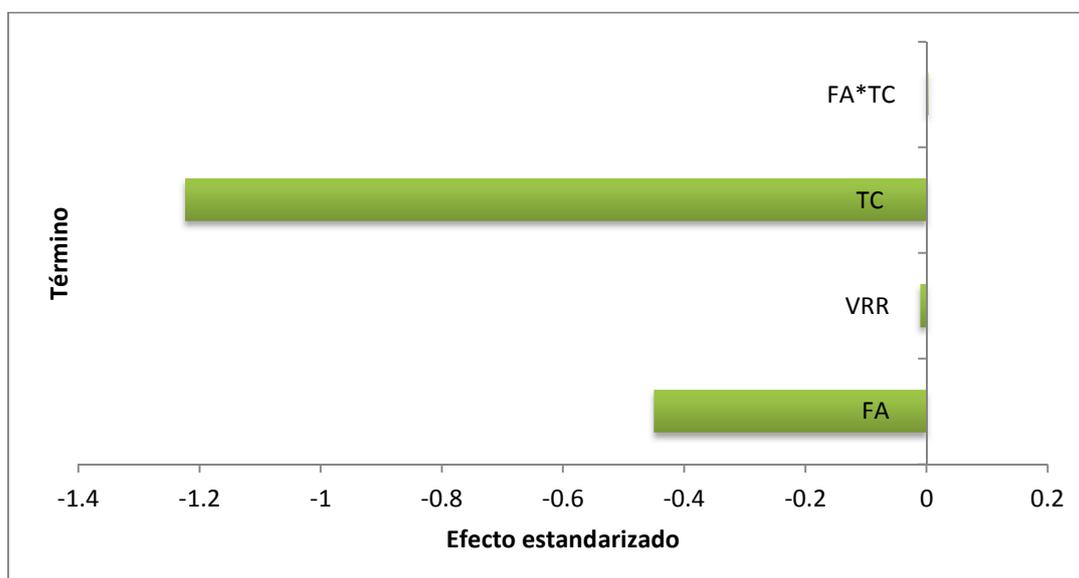
**Figura 24. Actividad residual de la enzima PME.**

La actividad de PME en ningún tratamiento se manifestó con mayor intensidad respecto al testigo (7.57 UPME). Adicionalmente Rodrigo *et al.*, (2006), reportan que la inactivación de PME en puré de tomate se alcanzó a 70 °C durante 5 minutos, ocasionando que la actividad residual redujera en un 60%.

El polinomio de respuesta con las unidades no codificadas (Anexo 9) muestra que las variables experimentales que disminuyeron la actividad de esta enzima fueron en primer lugar el flujo de alimentación y en segundo la interacción flujo y temperatura de calentamiento, como se presenta en la Ecuación 37.

$$PE = 183.43 - 0.44FA - 0.009VRR - 1.22TC + 0.003FA*TC \quad (37)$$

Esto se relaciona con lo presentado en la gráfica de Pareto (Figura 25), donde se observa que las variables antes mencionadas fueron las que tuvieron mayor influencia en la actividad residual de esta enzima.



FA: Flujo de alimentación, VRR: Velocidad de rotación de raspadores, TC: Temperatura de calentamiento.

**Figura 25. Gráfica de Pareto ( $\alpha=0.05$ ) para la evaluación de la actividad residual de PME.**

El estudio del efecto de la temperatura en la inactivación de la PME es de gran importancia en los alimentos, especialmente en la industria de los jugos y purés, debido a que disminuye el grado de esterificación de las moléculas de pectina. Esta disminución ocasiona dificultades para alcanzar la calidad y viscosidad en el producto final. Por lo que algunas veces se recurre a compensar esta pérdida, agregando pectina comercial, generando costos de producción elevados. De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo resulta más conveniente lograr la inactivación de esta enzima durante el procesamiento térmico, trabajando a flujos bajos (200 mL/min) y temperaturas de calentamiento altas (155°C). Debido a que el puré permanece mayor tiempo de residencia ( $T_m = 6.4$  minutos) durante el tratamiento térmico, lo cual favorece a la inactivación de esta enzima.

### 6.6.2. Evaluación del color del producto.

El color es una característica de gran importancia en la valoración física y de calidad en los alimentos. Por otra parte, en ciertos alimentos la aparición de coloraciones marrones frecuentemente indeseadas, se asocia a reacciones de pardeamiento no enzimático (reacción de Maillard, propiciada por las altas temperaturas), pardeamiento de tipo enzimático y el producido por la caramelización de los azúcares, en la superficie del alimento (Contreras, 2006).

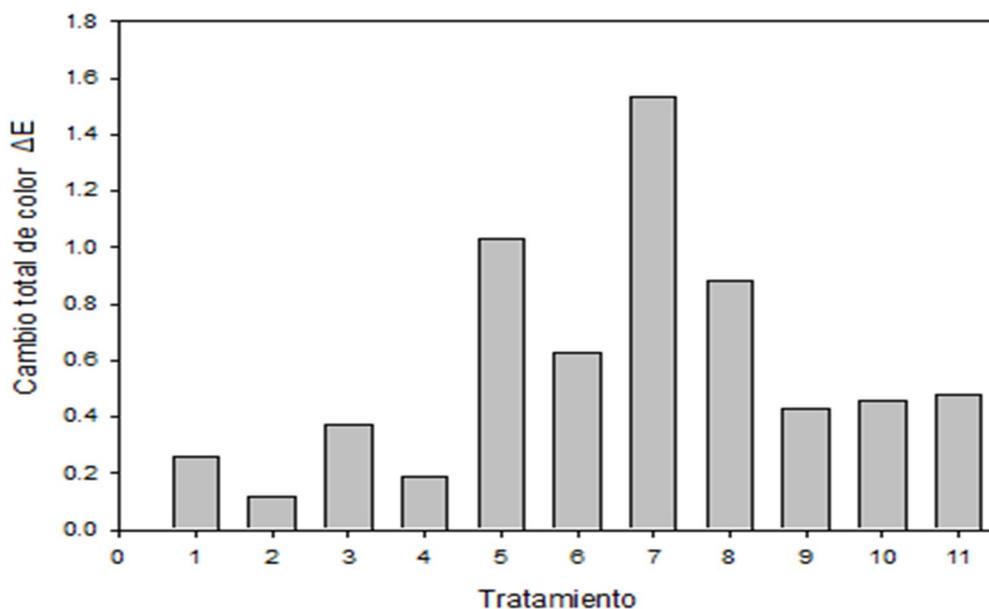
Los resultados se presentan en la Figura 26, donde se observa que el mayor cambio en color ( $\Delta E$ ), se presentaron en el tratamiento 5 y 7, con un  $\Delta E = 1.03$  y  $1.53$ , respectivamente. Además fue en estas corridas donde se alcanzó las temperaturas promedio más elevadas durante el procesamiento del puré y la inactivación del puré, indicando que la temperatura ejerce un efecto significativo.

De acuerdo a los parámetros de color, estos se localizan en el primer cuadrante ( $+a^*$ ,  $+b^*$ ), que corresponden al amarillo, asociando esta característica con el color del puré manejado. Reis (2006) y Ramírez y Delahaye (2011), mencionan que el cambio de color puré de guayaba se asocia con la síntesis y degradación de pigmentos.

Respecto a los tratamientos que presentaron menor variación en el  $\Delta E$ , fueron el (1, 2, 3 y 4) todos evaluados a una temperatura de calentamiento de  $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ , además en promedio el tiempo medio de residencia para estos tratamientos fue de 3.4 minutos, lo cual favorece en la retención del color en el puré de guayaba durante el tratamiento térmico. En contraste, en los tratamientos (5, 6, 7 y 8) que se trabajaron a una temperatura de calentamiento de  $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pero que tuvieron en promedio un mayor tiempo de residencia ( $T_m = 5$  minutos), la variación en color fue más alta ( $\Delta E = 1.0$ ), generando así una mayor pérdida en este parámetro de calidad.

También se observó que el incremento en la velocidad de rotación (100 a 500 rpm) ocasiona mayor variación en el color.

De igual manera, Soares *et al.*, (2007), al determinar la composición química de guayaba en diferentes etapas de madurez, obtiene valores de  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , de 53.83, -9.78 y 22.25, respectivamente, valores dentro del intervalo a lo reportado en el presente estudio.



**Figura 26. Valoración del color durante el tratamiento térmico de puré de guayaba.**

Ramírez y Delahaye (2011), encontraron que en frutos de guayaba el color verde disminuye en función de la disminución del nivel de clorofila, mientras que el color amarillo incrementa en función del incremento del nivel de carotenoides.

Mayer *et al.*, (2005), menciona que la estabilidad del color y compuestos esenciales como los carotenoides durante el tratamiento térmico de zanahoria, es dependiente del tiempo y temperatura. Reportando que a temperaturas en el intervalo de 50 a 90 °C se tienen porcentajes de retención óptimos.

### 6.6.3. Fenoles totales

La determinación del contenido de fenoles totales fue incluida en el estudio debido a que en investigaciones anteriores se encontraron una alta correlación entre fenoles totales y actividad antioxidante en varias clases de frutas según lo indica Vasco *et al.*, (2008). En el Cuadro 11 se presentan las condiciones manejadas y temperaturas alcanzadas durante el tratamiento térmico a fin de relacionar cada uno de los tratamientos con los porcentajes de retención encontrados en este estudio (Cuadro12).

El contenido de fenoles totales determinados durante el tratamiento térmico de puré de guayaba, muestra que en promedio en la totalidad de los tratamientos se logró retener el 80% de estos compuestos. Sin embargo, el tratamiento 5 y 7 son los que poseen el menor porcentaje de retención, siendo estos los que alcanzaron las temperaturas de 88.9 y 89.2 °C y las que inactivaron la PME con el mayor cambio en color, respectivamente. Además fue en estos tratamientos donde se presentaron los menores coeficientes de transferencia de calor (en promedio 300 W/m<sup>2</sup>°C) y un mayor tiempo de residencia ( $T_m = 6.4$  minutos).

**Cuadro 12. Contenido de fenoles totales en puré de guayaba.**

| Tratamiento | AT            | DT            | % de Retención |
|-------------|---------------|---------------|----------------|
| 1           | 381.24 ± 0.89 | 326.79 ± 0.56 | 85.72          |
| 2           | 381.79 ± 0.71 | 340.85 ± 0.49 | 89.28          |
| 3           | 370.47 ± 0.75 | 289.54 ± 0.63 | 78.15          |
| 4           | 323.78 ± 0.82 | 263.26 ± 0.29 | 81.31          |
| 5           | 361.77 ± 0.70 | 273.24 ± 0.88 | 75.53          |
| 6           | 356.05 ± 0.75 | 283.05 ± 0.43 | 79.50          |
| 7           | 335.99 ± 0.57 | 253.28 ± 0.50 | 75.38          |
| 8           | 358.08 ± 0.93 | 279.13 ± 0.45 | 77.95          |
| 9           | 367.80 ± 0.39 | 303.96 ± 0.95 | 82.64          |
| 10          | 354.65 ± 0.43 | 292.03 ± 0.78 | 82.34          |
| 11          | 364.65 ± 0.72 | 300.03 ± 0.84 | 82.28          |

AT: antes de tratamiento, DT: después de tratamiento

Valor promedio ± desviación estándar

Al respecto, en ambos tratamientos (5 y 7) las condiciones de operación del intercambiador fueron a flujos de alimentación de 200 mL/min, velocidad de rotación = 100 rpm y temperatura de calentamiento = 155 °C, es decir existió un efecto directo de la temperatura de calentamiento y el flujo de alimentación sobre el contenido de fenoles totales.

En contraste el comportamiento presentado en los tratamientos 6 y 8, fue que al aumentar la velocidad de rotación de 100 a 500 rpm, manteniendo una temperatura de calentamiento de 155 °C y un flujo de 400 mL/min, el porcentaje de retención disminuyó en 2%. No obstante, aunque se presentaron mínimas diferencias en los porcentajes de retención a temperaturas de calentamiento altas (155 °C), estas estuvieron muy por debajo a las encontradas a 145 °C. Por lo tanto, se recomienda trabajar a temperaturas de calentamiento bajas (145 °C), con flujos altos (400 mL/min) y velocidades de rotación bajas (100 rpm) con la finalidad de retener el mayor porcentaje de estos compuestos y así contribuir en la calidad del producto final.

Thaipong *et al.*, (2006), al estimar la actividad antioxidante en extractos para cuatro genotipos de guayaba, reporta valores desde 170.0±5.6 hasta 344.9±33.6 mg equivalentes de ácido gálico/100 g muestra fresca. Valores que se encuentran dentro del intervalo a lo reportado en este estudio.

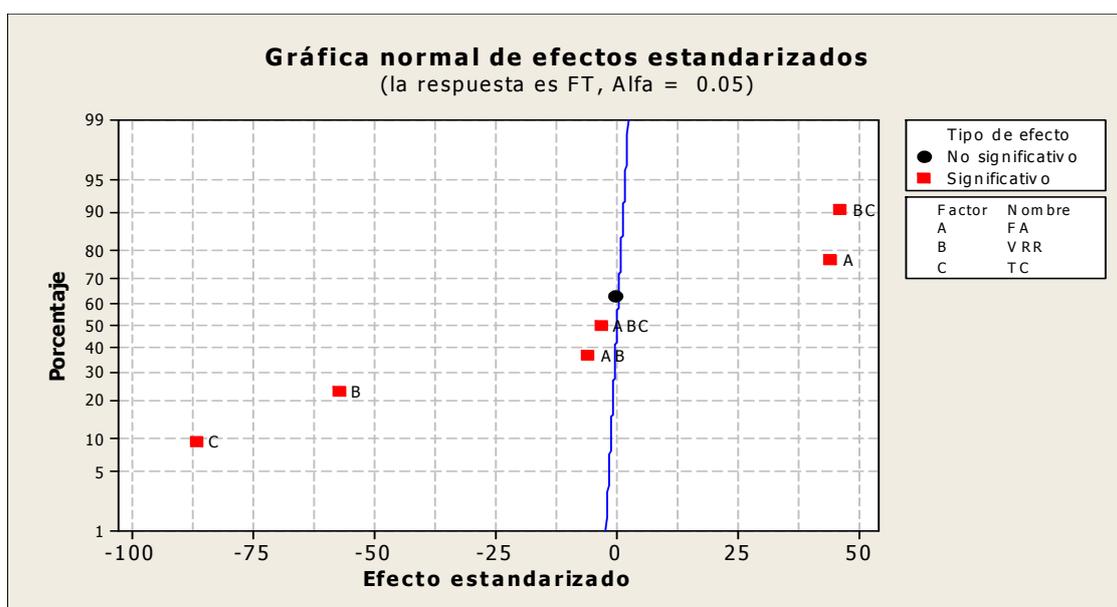
De igual manera, Marquina *et al.* (2008) indica que en la fruta fresca, la capacidad antioxidante aumenta con el contenido de polifenoles totales en la piel, la pulpa de la baya y el casco. Atribuyendo que la transformación de la pulpa de fruta en mermelada, redujo el contenido de polifenoles totales presentes en la pulpa en un factor mayor de cinco, por lo que se recomienda consumir la pulpa de fruta en lugar de la mermelada, a fin de aprovechar los polifenoles contenidos en la fruta.

La Ecuación 38 muestra el polinomio de respuesta con las unidades no codificadas (Anexo 10) para la retención de fenoles totales.

Con base en los coeficientes de esta ecuación, se observa que el flujo de alimentación y la interacción velocidad de rotación y temperatura de calentamiento fueron las variables en torno a las cuales disminuyó considerablemente el porcentaje de retención de fenoles totales.

$$FT = 268.13 - 0.02FA - 0.32VRR - 1.27TC + 0.0001FA*VRR + 0.0003FA*TC + 0.002VRR*TC \quad (38)$$

En la Figura 27, se observa que la interacción velocidad de rotación y temperatura de calentamiento tuvieron un papel sinérgico en la retención, mientras que el efecto antagónico está representado por la temperatura de calentamiento en su nivel más elevado.



**Figura 27. Grafica normal para las variables experimentales y la retención de fenoles totales.**

Resultados similares obtuvo Pascual (2011), indicando que al trabajar con temperaturas altas (155 °C) en el intercambiador se tienen pérdidas de carotenos cercanas al 20%. Por otro lado, Flores (2005) encontró que la temperatura del medio de calentamiento a 155 °C no es adecuada para el tratamiento de puré de zanahoria, ya que provoca olor y sabor a cocido.

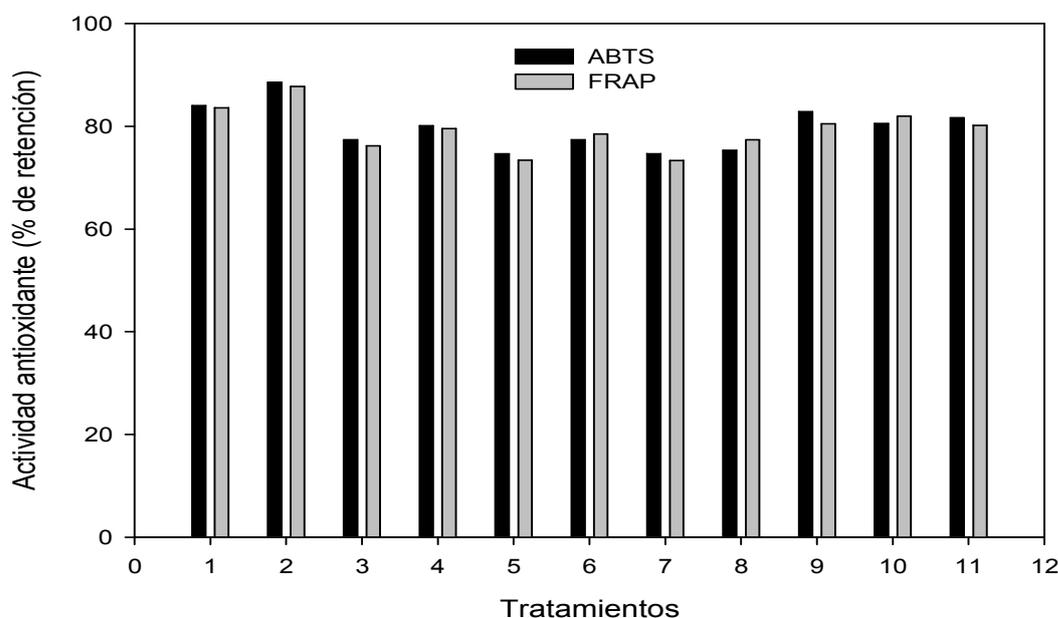
#### 6.6.4. Actividad antioxidante

Varios componentes de los alimentos como carotenoides, vitamina C, Vitamina E, compuestos fenólicos y sus interacciones contribuyen a la actividad antioxidante de los alimentos (Pinelo, *et al.*, 2004). Por lo que en el estudio se evaluó la capacidad antioxidante por medio de los ensayos ABTS y FRAP, que se basan en mecanismos diferentes para la medición de la actividad antioxidante. ABTS mide la habilidad de transferencia de átomos de H fenólicos mientras que FRAP mide la capacidad reductora del extracto. Aunado a que diversos trabajos relacionan la capacidad antioxidante con el contenido de fenoles totales (Frankel *et al.*, 1995; Imeh y Khokhar, 2002; Pinelo *et al.*, 2004; Roberts y Gordon, 2003; Sun, 2002; Ursini *et al.*, 1999) cada componente fenólico puede contribuir de forma y proporción diferente. Las condiciones manejadas y temperaturas alcanzadas durante el tratamiento térmico se presentan en el Cuadro 11.

Los resultados obtenidos de la actividad antioxidante expresados en porcentaje de retención por medio del ensayo ABTS y FRAP se presentan en la Figura 28. Donde se puede observar que el mayor porcentaje de retención obtenido por el ensayo ABTS y FRAP (88.59 y 87.74%, respectivamente) se presentó en el tratamiento 2, en condiciones de flujo de alimentación de 400 mL/min, temperatura de calentamiento de 145 °C y velocidad de rotación de 100 rpm. Al relacionar estos valores se encontró que fue en este tratamiento donde se obtuvieron los coeficientes internos de transferencia de calor experimental y teóricos más altos para las tres etapas del ICSR, además de obtener el menor tiempo de residencia ( $T_m = 3.22$  minutos). Por lo tanto, de acuerdo a estos valores se establece que realizando un tratamiento térmico a las condiciones antes mencionadas se favorece una mayor retención de compuestos bioactivos.

De acuerdo al diseño implementado y la posterior operación del ICSR se observó que cuando hubo un incremento en la velocidad de rotación de 100 a 500 rpm, pero manteniendo el mismo flujo y temperatura de calentamiento de 200 y 145 °C, respectivamente, el porcentaje de retención de la actividad antioxidante redujo en promedio en un 8% para los dos ensayos. Mientras que

al mantener la temperatura de calentamiento y velocidad de rotación de 145 y 100 rpm, respectivamente, pero solo variando el flujo de 200 a 400 mL/min se logró favorecer la retención en un 5%, esto debido a la reducción en el tiempo de retención.



**Figura 28. Porcentaje de retención de la actividad antioxidante por medio de los ensayos ABTS y FRAP.**

Para los tratamientos 5 y 7 se obtuvo el menor porcentaje de retención que fue de 74.65 y 74.66%, respectivamente, para el ensayo ABTS. Y para el ensayo FRAP fueron de 73.41 y 73.35% en estos mismos tratamientos. Ismail y Kong (2001), reportan valores de 77.78% de retención durante el procesamiento de puré de guayaba a nivel industrial. Adicionalmente, Restrepo *et al.*, (2009), al evaluar el efecto de la temperatura a 20, 50 y 73 °C sobre el contenido de polifenoles totales y la actividad antioxidante medida por las técnicas de ABTS y FRAP en guayaba, reporta porcentajes de retención desde 63 hasta el 86%. No obstante, el incremento en la temperatura disminuye la cantidad de fenoles totales y actividad antioxidante por ABTS y FRAP, lo cual puede ser un indicativo del efecto de degradación que tiene la temperatura alta sobre los fenoles totales y otros compuestos con actividad antioxidante.

Entre los métodos utilizados para determinar la capacidad de un antioxidante para captar radicales libres, el radical ABTS+ es uno de los más aplicados, al considerarse un método de elevada sensibilidad, práctico, rápido y muy estable (Arnao, 2002).

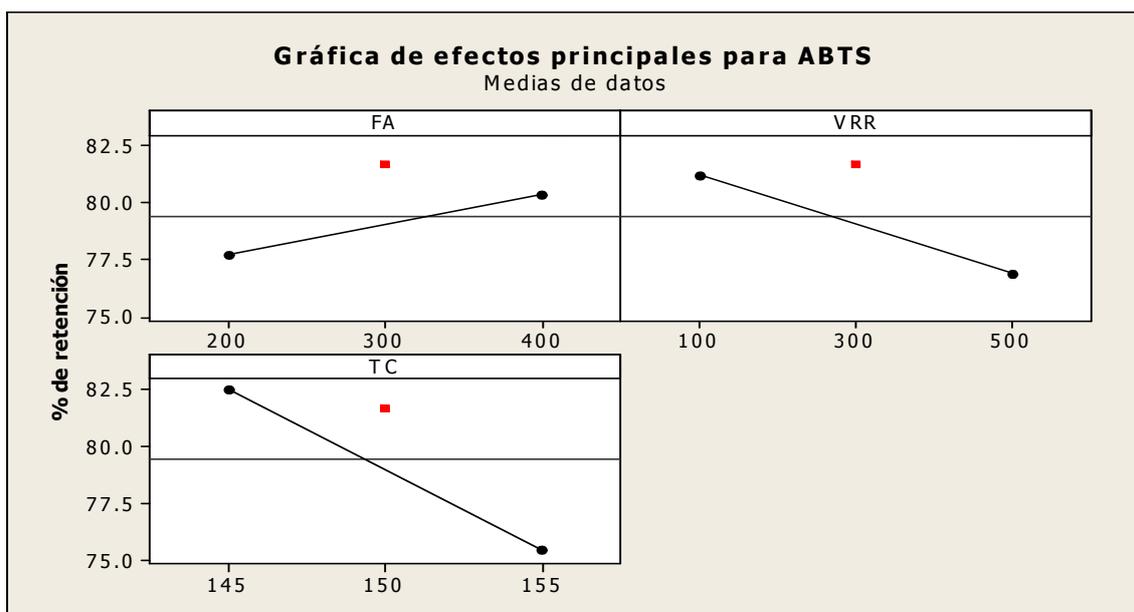
El ANOVA (Anexo 11 y 12) indica que existen diferencias significativas entre tratamientos a un nivel de significancia de ( $\alpha = 0.05\%$ ).

De acuerdo al polinomio de respuesta con unidades no codificadas (Ec. 39 y 40) el porcentaje de retención en ambos ensayos disminuyó entorno a las variables flujo de alimentación y la interacción velocidad de rotación y temperatura de calentamiento.

$$ABTS = 216.00 + 0.15FA - 0.26VRR - 0.93TC + 0.001VRR*TC \quad (39)$$

$$FRAP = 270.01 - 0.05FA - 0.29VRR - 1.30TC + 0.0004FA*TC + 0.001VRR*TC \quad (40)$$

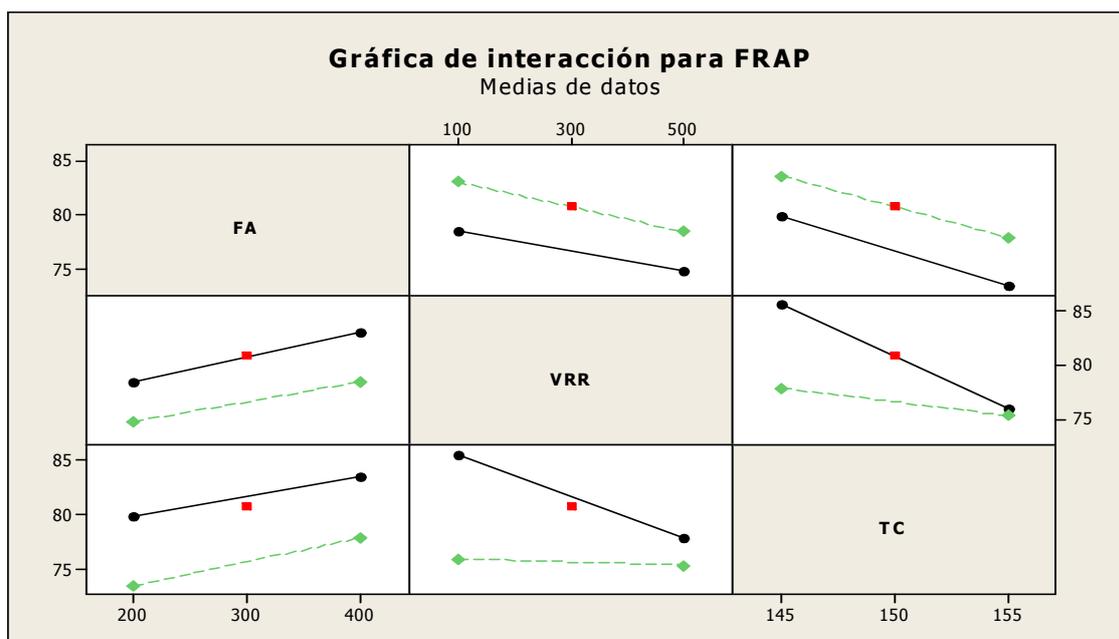
Estas variaciones se aprecian mejor en la Figura 29, indicando que al aumentar el flujo se favorece la retención de la capacidad antioxidante. Sin embargo, al elevar la velocidad de rotación y la temperatura de calentamiento se ocasionan pérdidas significativas.



**Figura 29. Gráfica de efectos principales para la retención de actividad antioxidante mediante el ensayo ABTS.**

Los resultados determinados mediante este ensayo FRAP se encuentran por arriba de lo reportado por Contreras (2011) que fue de  $61.9 \pm 0.38 \mu\text{mol Eq. FeSO}_4/\text{g}$  muestra fresca, al determinar la capacidad antioxidante, fenoles totales y vitamina C en pulpa de guayaba. Restrepo (2009) menciona que la temperatura durante el procesamiento térmico ejerce un factor significativo en la retención de la actividad antioxidante, reportando valores desde 86 hasta  $108 \mu\text{mol Eq. FeSO}_4/\text{g}$  muestra fresca, resultados que son similares a los obtenidos en este estudio.

Para observar la interacción de los efectos principales que contribuyeron a la retención y disminución de estos compuestos bioactivos, se construyó la gráfica que relaciona los factores manejados durante el tratamiento térmico y los porcentajes de retención (Figura 30).



**Figura 31. Gráfica de interacciones para la retención de actividad antioxidante mediante el ensayo FRAP.**

De acuerdo a la Figura 31, se tiene que la velocidad de rotación y temperatura de calentamiento en su nivel bajo favorecen la retención de la actividad antioxidante, y el flujo en su nivel bajo disminuye la retención. Indicando que resulta más conveniente llevar a cabo un tratamiento térmico en el ICSR considerando velocidades de rotación y temperaturas de calentamiento bajos, combinándolo con flujos altos. Para así favorecer en la retención de estos compuestos benéficos para la salud.

Por lo tanto, una vez determinados los coeficientes de transferencia de calor, distribución de tiempos de residencia y al evaluar el efecto del tratamiento térmico sobre los parámetros de calidad es importante establecer una relación la cual permita apreciar de mejor manera el efecto de cada una de estas variables. Con la finalidad de encontrar las mejores condiciones de proceso durante el tratamiento térmico de puré de guayaba en el ICSR. Este análisis se presenta en el siguiente apartado.

### **6.7. Relación entre los parámetros bioquímicos, coeficientes de transferencia de calor y distribución de tiempos de residencia.**

De acuerdo a los parámetros bioquímicos analizados (color, vitamina C, fenoles totales y actividad antioxidante) se observó que el flujo de alimentación es un factor significativo en la retención de estos compuestos. No obstante al relacionarlos con los tiempos medio de residencia, la mayor retención se obtiene cuando se trabaja a flujos y velocidad de rotación altas (400 mL/min y 500 rpm, respectivamente), provocando así que el puré permanezca el menor tiempo de residencia ( $T_m = 3.22$  min). Aunado a que en estas condiciones es donde se obtienen los coeficientes internos de transferencia de calor experimentales y teóricos más altos para las tres etapas de procesamiento (calentamiento, pre-enfriamiento y enfriamiento).

En contraste, flujos de alimentación bajos (200 mL/min) con temperaturas de calentamiento y velocidad de rotación altos (155 °C y 500 rpm, respectivamente) generan un mayor tiempo de residencia ( $T_m = 6.42$  min), no obstante a estas condiciones se logra inactivar la enzima pectinmetilesterasa (Tratamientos 5 y 7). Sin embargo en estos tratamientos se cuantificaron los menores porcentajes de retención de los parámetros bioquímicos y coeficientes tanto experimental como teórico.

Por lo tanto, con base a los resultados obtenidos es más conveniente llevar a cabo un tratamiento térmico en el puré de guayaba utilizando condiciones de flujo de alimentación altos (400 mL/min) combinados con velocidades de rotación altas (500 rpm) y temperaturas de calentamiento bajas (145 °C). Todo esto con la finalidad de retener la mayor cantidad de compuestos antioxidantes, favoreciendo una mejor transferencia de calor y un menor tiempo de residencia del producto, aunque no se logre una completa inactivación de la enzima PME.

## VII. CONCLUSIONES

- Los coeficientes de transferencia de calor más altos se obtienen a flujos de alimentación y velocidades de rotación altas (100 rpm y 400 mL/min).
- Con respecto a los coeficientes internos de transferencia de calor, los coeficientes predichos por la ecuación de Skelland depende mucho del valor de la viscosidad, ya que los porcentajes de diferencia redujeron de un 70 a un 20% al corregir el valor de la viscosidad por temperatura.
- En cuanto a las curvas de distribución de tiempo de residencia el incremento de manera simultánea del flujo (200 a 400 mL/min) y la velocidad de los raspadores (100 a 500 rpm) generó un menor tiempo de residencia ( $T_m = 3.22$  min), lo cual favorece la retención de componentes bioquímicos y mejores coeficientes internos de transferencia de calor.
- Los tratamientos térmicos realizados al puré de guayaba en general lograron retener el 80% de vitamina C, compuestos fenólicos y actividad antioxidante, sin embargo los únicos que inactivaron la enzima pectinmetilesterasa fueron aquellos en los que el puré alcanzó en promedio 90°C como temperatura interna y presentan un mayor tiempo de residencia ( $T_m = 6.42$  min), lo que ocasiona el mayor cambio en color y menor retención de componentes bioquímicos.
- Con base al estudio realizado es más conveniente desde el punto de vista de lograr la menor termodegradación de los componentes bioquímicos, el tratar el puré de guayaba utilizando flujos y velocidades de rotación de los raspadores altos, teniendo bajos tiempos de residencia y mejores coeficientes de transferencia de calor, aunque no se logre la completa inactivación de la enzima PME.

### VIII. RECOMENDACIONES PARA TRABAJO FUTURO

Para llevar a cabo un tratamiento térmico en el ICSR se recomienda trabajar a flujos y velocidades de rotación altas (400 mL/min y 500 rpm, respectivamente) combinándolo con temperaturas de calentamiento bajas (145 °C). Debido a que estas condiciones favorecen la mayor retención de componentes bioquímicos y se obtienen mejores coeficientes de transferencia de calor.

Se sugiere evaluar nuevas condiciones de operación (flujos de alimentación, temperatura de calentamiento y velocidad de rotación de raspadores) con la finalidad de alcanzar la inactivación de la enzima pectinmetilesterasa y contribuir en la obtención de un alimento con mayor estabilidad y calidad nutricional.

En trabajos posteriores al determinar los coeficientes internos de transferencia de calor teóricos mediante la ecuación de Skelland es importante considerar el efecto de las placas raspadoras del ICSR sobre la viscosidad. Debido a que este factor ocasiona una disminución en la viscosidad y consecuentemente menores porcentajes de diferencia al compararlos con los coeficientes experimentales.

---

---

**IX. BIBLIOGRAFÍA**

- Abichandani, H. y Samarma, S. C. (1987). Hydrodynamics and Heat transfer in liquid full scraped surface heat exchangers a review. *Journal of Food Process Engineering*, 121-141.
- Abichandani, H. y Samarma, S. C. (1988). Residence time distribution in horizontal thin film scraped surface heat exchanger (SSHE). *Journal of Food Process Engineering*, 10, 71-80.
- Ahmed, J., Shivhare, U. S. y Singh, P. (2004). Colour kinetics and rheology of coriander leaf puree and storage characteristics of the paste. *Food Chemistry*, 84(4), 605-611.
- Alvarado, J. y Aguilera, J. (2001). Métodos para medir propiedades físicas en industrias de alimentos. Ed. Acribia. España. 426.
- Andrade, D. R., Ortega, Q. F., Montes, M. E., Torres, G. R., Pérez, S. O., Castro, N. M. y Gutierrez, S. L. (2009). Caracterización fisicoquímica y reológica de la pulpa de guayaba (*Psidium guajava* L.) variedades híbrido de klom sali, puerto rico, d14 y red. Vitae. *Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*, 16(1), 13-18.
- AOAC. (1995). Official Method of Analysis. In : Methods of Analysis of AOAC International. 16 Edition. *Association of Official Analytical Chemests*. Mayrland, USA.
- Arnao, M. B. (2000). Some methodological problems in the determination of antioxidant activity using chromogen radicals: a practical case. *Trends Food Sci. Technol*, 11, 419-421.
- Barbosa, C. G. V. y Bermúdez, A. D. (2010). Procesamiento no térmico de alimentos. *Scientia Agropecuaria*, 1, 81-93.
- Bashir, H. A., Abu, B. A. y Abu, G. (2003). Compositional changes during guava fruit ripening. *Food Chemistry*, 80, 557–563.
- Benzie, I. F. F. y Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: The frap assay. *Analytical Biochemistry*, 239, 70-76.

- Boccardi, G., Celata, G. P., Lazzarini, R., Saraceno, L. y Trinchieri, R. (2010). Development of a heat transfer correlation for a Scraped-Surface Heat Exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 30, 1101-1106.
- Cabral, R. A. F., Telis, R. J., Telis, V. R. N., Gabas, A. L. y Finzer, J. R. D. (2007). Effect of apparent viscosity on fluidized bed drying process parameters of guava pulp. *Journal of Food Engineering*, 80, 1096-1106.
- Carabalí, M. I. L., Narváez, C. C. E. y Restrepo, S. L. P. (2009). Extracción y medida de actividad de pectin-metil-estearasa en pitaya amarilla (*Acanthocereus pitajaya*), enzima relacionada con el ablandamiento. *Acta biol. Colomb*, 14(2), 73-82.
- Carcamo, A. L. (2005). Comportamiento reológico de pasta de murta (*Ugni molinae turcz*) en estado fresco y congelado. Tesis de licenciatura. Universidad austral de Chile. Chile. 97.
- Chen, H. Y. y Yen, G. C. (2007). Antioxidant activity and free radical-scavenging capacity of extracts from guava (*Psidium guajava* L.) leaves. *Food Chemistry*, 101, 686-694.
- Cheng, H. L., Soh, C. Y., Liew, S.C. y Teh, F. F. (2007). Effects of sonication and carbonation on guava juice quality. *Food Chemistry*, 104, 1396-1401.
- Claude, R. A. (2004). Reología y análisis de la textura de los alimentos. Editorial Acribia. España. 210.
- Contreras, C. J., Calderón, J. L., Guerra H. E. y García, V. B. (2011). Antioxidant capacity, phenolic content and vitamin C in pulp, peel and seed from 24 exotic fruits from Colombia. *Food Research International*, 44, 2047-2053.
- Contreras, M. C. (2006). Influencia del método de secado en parámetros de calidad relacionados con la estructura y el color de manzana y fresa deshidratadas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. 203.

- D'Addio, L., Carotenuto, C., Di Natale, F. y Nigro, R. (2011). A new arrangement of blades in scraped surface heat exchangers for food pastes. *Journal of Food Engineering*, 108, 143-149.
- Da Silva C. K. M., Tadiotti, A. C., Baldochi, D. y Mascarenhas F. O. M. (2006). Partial purification, heat stability and kinetic characterization of the pectinmethylesterase from Brazilian guava, Paluma cultivars. *Food Chemistry*, 94, 565-572.
- Dewanto, V., Wu, X., Adom, K. y Liu, R. (2002). Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity. *J Agric. Food Chem*, 50, 3010-3014.
- Dicko, M. H., Hilhorst, R., Gruppen, H., Traore, A. S., Laane, C., Van-Berkel, W. J. H. y Voragen, A. G. J. (2002). Comparison of phenolic compounds, polyphenols oxidase, and peroxidase in grains of fifty sorghum varieties from Burkiso Faso. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 3780-3788.
- Dutta, D., Dutta, A., Raychaudhuri, U. y Chakraborty, R. (2006). Rheological characteristics and thermal degradation kinetics of beta-carotene in pumpkin puree. *Journal of Food Engineering*, 76(4), 538-546.
- FAO. (2008). Food and Agricultural Organization. <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>. Accesado: Febrero 2011.
- Firuzi, O., Lacanna, A., Petrucci, R., Marrosu, G. y Saso, L. (2005). Evaluation of the antioxidant activity of flavonoids by "ferric reducing antioxidant power" assay and cyclic voltammetry. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1721, 174-184.
- Flores, L. Y. (2005). Termoprocesamiento de puré de zanahoria en intercambiador de calor de superficie raspada piloto y efectos sobre sus carotenoides. Tesis de Maestría. IPN-ENCB; México.
- Fogler, H. S. (1986). Elements of Chemical Reaction Engineering. 2a ed. Ed. Prentice-Hall. U.S.A. 1080.

- Franke, A. A., Custer, L. J., Arakaki, C. y Murphy, S. P. (2004). Vitamin C and flavonoid levels of fruits and vegetables consumed in Hawaii. *Journal of Food Composition and Analysis*, 17, 1-35.
- Frankel, E. N., Waterhouse, A. L. y Teissedre, P. L. (1995). Principal phenolic phytochemicals in selected California wines and their antioxidant activity in inhibiting oxidation of human low density lipoproteins. *J. Agric. Food Chem*, 43, 890-894.
- Geankopolis, C. J. (1999). Procesos de transporte y operaciones unitarias. Compañía editorial continental, S.A. de C.V. México. 1007p.
- Ghani, A. G. A., Farid M. M. y Chen X. D. (2002). Theoretical and experimental investigation of the thermal destruction of vitamin C in food pouches. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34, 129-143.
- Goldstein, R. J., Eckert, E. R. G., Ibele, W. E., Patankar, S. V., Simon, T. W., Kuehn, T. H., Strykowski, P. J., Tamma, K. K., Bar-Cohen, A., Heberlein, J. V. R., Davidson, J. H., Bischof, J., Kulacki, F. A., Kortshagen, U., Garrick, S. y Srinivasan, V. (2005). Heat transfer-a review of 2002 literature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 819-927.
- Guo, C., Yang, J., Wei, J., Li, Y., Xu, J. y Jiang, Y. (2003). Antioxidant activities of peel, pulp and seed fractions of common fruits as determined by FRAP assay. *Nutr. Res*, 23, 1719-1726.
- Härröd, M. (1986). A literatura survey of flow patterns, mixing effects, residence time distributions, heat transfer and power requirements in Scraped surface heat exchangers. *Journal of Food Process Engineering*, 9, 1-62.
- Heldman, D. R. y Lund, D. B. (2007). Handbook of food engineering. Second edition. CRC Press, Taylor & Francis Group. U.S.A. 1023.
- Hennequin, F., Della Valle, D. y Fayolle, F. (1999). Residence time distribution measurements for the understanding of the transfers in scraped-surface heat exchangers. *Récents Progrès en Génie des Procédés*, 13(69), 403-410.
- Hernández, M. S. (2009). Postharvest quality of araza fruit during low temperature storage. *Food Science and Technology*, 42(3), 879-884.

- 
- 
- Hultin, H. O., Bonnie, S. y Buller, J. (1948). Pectin methyl esterase of banana. Purification and property. *Methods in Enzimology*, 1, 159-173.
- Hui, H. (2006). Handbook of fruits and fruit processing. 1st ed. USA. 225p.
- Ibarz, A. 2005. Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 865.
- Ibarz, A. y Manayay, D. (2010). Modelamiento de la cinética de reacciones del pardeamiento no enzimático y el comportamiento reológico, en el proceso térmico de jugos y pulpas de fruta. *Scientia Agropecuaria*, 1, 155-168.
- Ibarz, A. y Barbosa-Canóvas, G. V. (1999). Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos. Technomic Publishing Company, Inc. Pennsylvania. USA. 85-204.
- Imeh, U. y Khokhar, S. (2002). Distribution of conjugated and free phenols in fruits: antioxidant activity and cultivar variations. *J. Agric. Food Chem*, 50, 6301-6306.
- Ismail, A. y Kong, K. W. (2011). Lycopene content and lipophilic antioxidant capacity of by-products from *Psidium guajava* fruits produced during puree production industry. *Food and Bioproducts Processing*, 89, 53-61.
- Jiménez, E. A., Rincón, M., Pulido, R. y Saura, C. F. (2001). Guava fruit (*Psidium guajava* L.) as a new source of antioxidant dietary fiber. *J. Agric. Food Chem*, 49(11), 5489-93.
- Karakaya, L. y Kavas, E. (1999). Considerations of scientific substantiation for antioxidant vitamins and carotene in disease prevention. *Am. J. Clin. Nutr.* 62(1), 521S-1526S.
- Katsube, N., Keiko, I., Tsushida, T., Yamaki, K. y Kobori, M. (2003). Induction of apoptosis in cancer cells by bilberry (*Vaccinium myrtillus*) and the anthocyanins. *J. Agric. Food Chem*, 51, 68-75.
- Kern, D. Q. (2001). Procesos de transferencia de calor. 32ª reimp. Ed. CECSA. México. 979.
- 
-

- Khairul, I. E. H., Hock, E. K., Mhd, J. A. M., Ismail, A., Idris, S., Azlan, A., Mohd, N. H. S., Mat, D. N. A y Mohd, M. R. A. (2009). Antioxidant capacity and total phenolic content of Malaysian underutilized fruits. *Journal of Food Composition and Analysis*, 22, 388-393.
- Kim, D-O., Lee, K. W., Lee, H. J. y Lee, C. Y. (2002). Vitamin C equivalent antioxidant capacity (VCEAC) of phenolics phytochemicals. *J. Agric. Food Chem*, 50, 3713-3717.
- Lakhdar, M. B., Cerecero, R., Alvarez G., Guilpart J., Flick, D. y Lallemand, A. (2005). Heat transfer with freezing in a scraped surface heat exchanger. *Applied Thermal Engineerig*, 25, 45-60.
- Lana, M. M., Tijssens, L. M. y Kooten, V. A. (2006). Modelling RGB colour aspects and translucency of fresh-cut tomatoes. *Postharvest Biology and Technology*, 40(1), 15-25.
- Lee, J. H. y Singh K. R. (1991). Particle Residence Time Distributions In a Model Horizontal Scraped Surface Heat Exchanger. *Journal Food Science*, 14, 25-146.
- Levenspiel, O. (1997). Flujo de fluidos e intercambiador de calor. 1a reimp. Ed. REVERTE, S.A. Barcelona, España. 373.
- Llano, L. E. (2007). Termoprocesamiento de puré de zanahoria papaya y su efecto sobre componentes bioquímicos y sensoriales. Tesis de Maestría. IPN-ENCB; México. 116p.
- Loarca-Piña, G., Mendoza, S., Ramos, G. M. y Reynoso, R. (2010). Antioxidant, antimutagenic, and antidiabetic activities of edible leaves from *Cnidioscolus chayamansa* Mc. Vaugh. *Journal of Food science*, 75(2), 68-72.
- Mabit, J., Belhamri, R., Fayolle, F. y Legrand, J. (2008). Development of a time temperature integrator for quantification of thermal treatment in scraped surface heat exchangers. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9, 516-526.

- Mabit, J., Fayolle, F. y Legrand, J. (2003). Shear rates investigation in a scraped surface heat exchanger. *Chemical Engineering Science*, 58, 4667-4679.
- Mabit, J., Loisel C., Fayolle, F. y Legrand, J. (2004). Relation between mechanical treatment of starch and flow conditions in a scraped surface heat exchanger. *Food Research International*, 37, 505-515.
- Maceiras, R., Ivarez, E. A. y Cancela M. A. (2007). Rheological properties of fruit purees: Effect of cooking. *Journal of Food Engineering*, 80, 763-769.
- Marin-Rodriguez, M.C., Orchard, J. y Seymour, G.B. 2002. Pec-tatellyases cell wall degradation and fruit softening. *Journal of Experimental Botany*. 53, 2115-2119.
- Marquina, V., Araujo, L., Ruíz, J., Rodríguez, M. A. y Vit, P. (2008). Composición química y capacidad antioxidante en fruta, pulpa y mermelada de guayaba (*Psidium guajava* L.). *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 58(1), 98-102.
- Martínez-Valverde, I., Periago, M. y Ros, G. (2000). Significado nutricional de los compuestos fenólicos de la dieta. *Arch. Latinam. Nutr*, 50, 5-18.
- Matos, C. A. y Aguilar, A. D. A. (2010). Influencia de la temperatura y concentración sobre el comportamiento reológico de la pulpa de tuna (*Opuntia ficus Indica*). *Revista de investigación en ciencia y tecnología de alimentos*, 1(1), 58-65.
- Mayer, M. E., Behsnilian, D., Regier, M. y Schuchmann, H. P. (2005). Thermal processing of carrots : Lycopene stability and isomerisation with regard to antioxidant potential. *Food Research International*, 38, 1103-1108.
- Méndez, D., García, J. y Mosquera, M. (2002). Characterization of caroenoid high-producing *Capsicu Nahum* cultivars selected for paprika production. *J. AgriFood Chem*, 50, 5711-5716.

- Menéndez, A. O., Evangelista, L. S., Arenas, O. M., Bermúdez, T. K., Del Villar, M. A. y Jiménez, A. A. (2006). Cambios en la actividad de  $\alpha$ -amilasa, pectinmetilesterasa y poligalacturonasa durante la maduración del maracuyá amarillo (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa* degener). *INCI*, 31(10), 728-733.
- Muller, H. 1978. Introducción a la reología de los alimentos. Editorial Acribia S.A., Zaragoza, España. 174.
- Naimi, M. (1989). Citado por: Mabit, J., Loisel, C., Fayolle, F., Legrand, J. (2004). Relation between mechanical treatment of starch and flow conditions in a scraped surface heat exchanger. *Food Research International*, 37, 505-515.
- Nindo, C. I., Tang, J., Powers, J. R. y Takhar, P. S. (2007). Rheological properties of blueberry puree for processing applications. *LWT*, 40, 292-299.
- NMX-F-103-1965. Norma oficial del método de prueba para la determinación de grados Brix.
- Pascual, R. J. (2011). Termoprocesamiento de un puré de mango en intercambiador de calor de superficie raspada y el efecto sobre sus componentes bioquímicos. Tesis de Maestría. IPN-ENCB; México. 109.
- Pelegrine, D. H., Vidal, J. R. y Gasparetto, C. A. (2004). Efeito da temperatura no comportamento reológico da polpa de manga (*Mangífera indica* L-keitt). *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas, 24(1), 039-042.
- Pérez, C. L. E. (2003). Aplicación de métodos combinados para el control del desarrollo del pardeamiento enzimático en pera (Variedad blanquilla) mínimamente procesada. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. 256.
- Pinelo, M., Monzocco, L., Nuñez, M. J. y Nicoli, M. C. (2004). Interaction among phenolics in food fortification: negative synergism on antioxidant capacity. *J. Agric. Food Chem*, 52, 1177-1180.
- Planella, V. I. (1987). Tecnología del manejo postcosecha de frutas y hortalizas. Bogotá. IICA. 287.

- Prior, R., Wu, X. y Schaich, K. (2005). Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *J. Agric. Food Chem*, 53(10), 4290-4302.
- Quintanar, H. (2008). Caracterización y capacidad de enfriamiento de un intercambiador de calor de superficie raspada utilizando puré de papaya (*Carica papaya*). Tesis de Maestría. IPN-ENCB; México. 104.
- Rahmat, A., Abu-Bakar, M. F., Faezah, N. y Hambali, Z. (2004). The effects of consumption of guava (*Psidium guajava*) or papaya (*Carica papaya*) on total antioxidant and lipid profile in normal male youth. *Journal Clinical Nutrition*. 13(S), S106.
- Ramírez, A. y Delahaye, P. E. (2011). Composición química y compuestos bioactivos presentes en pulpas de piña, guayaba y guanábana. *INTERCIENCIA*, 36(1), 71-75.
- Rangana, S. (1986). Handbook of analysis and quality control for fruit and vegetable products. 2a ed. Ed. McGraw Hill Publishing Co. New Dehli. 192.
- Rao, M. A. y Rizvi, S. S. H. (1995). Engineering properties of foods. Second edition. Marcel Dekker inc. USA. 99-130.
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M. y Rice-Evans, C. (1999). Free Radical. *Biol. Med*, 26, 1231.
- Reis, R. C., Ramos, A. M., Regazzi, A. J., Minim, V. P. R. y Stringueta, P. C. (2006). Almacenamiento de mango secado: análisis fisicoquímico, microbiológico, color y sensorial. *Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 5(3), 214-225.
- Restrepo, S. D. C., Narváez, C. C. E. y Restrepo, S. L. P. (2009). Extracción de compuestos con actividad antioxidante de frutos de guayaba cultivada en Vélez-Santander, Colombia. *Quim. Nova*, 32(6), 1517-1522.
- Restrepo, M. F. (1995). Evaluación sensorial de los alimentos. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 187.

- Roberts, W. G. y Gordon, M. H. (2003). Determination of the antioxidant activity of fruits and vegetables by a liposome assay. *J. Agric. Food Chem*, 51, 1486-1493.
- Rodrigo, D., Cortes, C., Clynen, E., Schoofs, L., Van, L. A. y Hendrickx, M. (2006). Thermal and high-pressure stability of purified polygalacturonase and pectinmethylesterase from four different tomato processing varieties. *Food Research International*, 39, 440-448.
- Rojas, B. D. y Narváez, C. C. E. (2009). Determinación de vitamina C, compuestos fenólicos totales y actividad antioxidante de frutas de guayaba (*Psidium guajava* L.) cultivadas en Colombia. *Quim. Nova*, 32(9), 2336-2340.
- Rojas, M. y Gerschenson, L. (2001). Ascorbic acid destruction in aqueous model systems: an additional discussion. *J. Sci. Food Agric*, 81, 1433-1439.
- Salvador, A. (2007). Physiological and structural changes during ripening and deastringency treatment of persimmon fruit cv. "Rojo Brillante". *Postharvest Biology and Technology*, 46(2), 181-188.
- Saraceno, L., Boccardi, G., Celata, G. P., Lazzarini, R. y Trinchieri, R. (2011). Development of two heat transfer correlations for a scraped surface heat exchanger in an ice-cream machine. *Applied Thermal Engineering*, 31, 4106-4112.
- Setiawan, B., Sulaeman, D., Giraud, D. y Driskell, J. (2001). Carotenoid content of selected Indonesian fruits. *J. Food Comp. Anal*, 14, 69-176.
- Seymour, G. B. y Gross, K. C. (1996). Cell wall disassembly and fruit softening. *Postharvest News and Information*, 7, 45N-52N.
- Shin, Y., Liu, H. R., Nock, F. J., Holliday, D. y Watkins, B. C. (2007). Temperature and relative humidity effects on quality, total ascorbic acid, phenolics and flavonoid concentrations, and antioxidant activity of strawberry. *Postharvest Biology and Technology*, 45, 349-357.

- SIAP. (2009). Sistema de información agropecuaria y pesquera. [http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com\\_wrapper&view=wrapper&Itemid=351](http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=351). Accesado: Febrero 2011.
- Siebel, J.E. (1982). Specific heat of various products. *Ice Refrig*, 2, 256-257.
- Singleton, V. L., Orthofer, R. y Lamuela-Raventos, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin–Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152–178.
- Skelland, A. H. P., Oliver, D. R. y Tooke, S. (1962). Heat transfer in a water-cooled scraped-surface heat exchanger. *Br. Chem. Eng*, 7, 346-353.
- Soares, D. F., Pereira, T., Marcia, O., Marques, M. M. y Monteiro, R. A. (2007). Volatile and non-volatile chemical composition of the white guava fruit (*Psidium guajava*) at different stages of maturity. *Food Chemistry*, 100, 15-21.
- Steffe, J. F. (1996). Rheological methods in food process engineering. 2nd Edition, Freeman, Michigan, USA. 418.
- Sulaeman, A., Keeler, L., Taylor, L., Giraud, D., Driskell, A. (2001). Carotenoid content, physicochemical and sensory quality of deep-fried carrot chips affected by dehydration/rehydration, antioxidant and fermentation. *J. Agric. Food Chem*, 49, 3253-3261.
- Sun, J., Chu, Y., Wu, X. y Liu, R. (2002). Antioxidant and antiproliferative activities of common fruits. *J. Agric. Food Chem*, 50, 7449-7454.
- Thaipong, K., Boonprakob, U., Crosby, K., Zevallos, C. L. y Hawkins, B. D. (2006). Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19, 669-675.
- Timoumi, S., Mihoubi, D. y Zagrouba, F. Shrinkage, vitamin C degradation and aroma losses during infra-red drying of apple slices. *LWT*, 40, 1648-1654.

- Uddin, M. S, Hawlader, M. N., Ding, L. y Mujumdar, A. S. (2002). Degradation of ascorbic acid in dried guava during storage. *Journal. of Food Engineering*, 51, 21-26.
- Ursini, F., Tubaro, F., Rapuzzi, P., Zamburlini, A. y Maiorino, M. (1999). Wine antioxidants: Effects in vitro and in vivo. Wine and Human Health. *Udine* 9-11.
- Van Boxtel, L. B. J. y De Fiellietaz Goethart, R. L. (1983). Heat transfer to water and some highly viscous food systems in a water-cooled scraped surface heat exchanger. *Journal of Food Process Engineering*, 7, 17-35.
- Vargas, B. J. L. (2004). Caracterización física y química de la guayaba blanca tailandesa (*Psidium guajava* L.) en tres etapas de madurez. Tesis de licenciatura. Zamorano, Honduras. 33.
- Vasco, C., Ruales, J. y Kamal-Eldin, A. (2008). Total phenolic compounds and antioxidant capacities of major fruits from Ecuador. *Food Chemistry*, 111, 816-823.
- White, P. J. (2002). Recent advances in fruit development and ripening: an overview. *Journal of Experimental Botany*, 53, 1995-2000.
- Willats, W. G. T., McCartney, L., Mackie, W. y Knox, J. P. (2001). Pectin: cell biology and prospects for functional analysis. *Plant Mol. Biol*, 47, 9-27.
- Yam, T. J., Villaseñor, P. C., Romantchik, E. K., Soto, E. M. y Peña, P.M. (2010). Una revisión sobre la importancia del fruto de Guayaba (*Psidium guajava* L.) y sus principales características en la postcosecha. *Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 19(4), 74-82.
- Yoo, K., Lie, K., Park, J., Lee, H. y Hwang, K. (2004). Variation in major antioxidants and total antioxidant activity of Yuzu (*Citrus junos* Sieb ex Tanaka) during maturation and between cultivars. *J. Agric. Food Chem*, 52, 5907-5913.

**X. ANEXOS**

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Índice de anexos   |             |
| Anexo 1. Resultados de viscosidad a 20°C.....  | 98          |
| Anexo 2. Resultados de viscosidad a 40°C.....  | 100         |
| Anexo 3. Cálculos para la determinación del coeficiente interno de transferencia de calor experimental para el tratamiento 1.....                                      | 102         |
| Anexo 4. Cálculos para la determinación del coeficiente interno de transferencia de calor teórico para el tratamiento 1.....   | 104         |
| Anexo 5. Curva tipo de concentración de NaCl contra conductividad de las muestra para 10 g de puré de guayaba con NaCl de 0 a 0.5g.....                                | 105         |
| Anexo 6. Análisis estadístico para el coeficiente de transferencia de calor experimental en la etapa de calentamiento.....   | 106         |
| Anexo 7. Análisis estadístico para el coeficiente de transferencia de calor experimental en la etapa de pre-enfriamiento.....  | 107         |
| Anexo 8. Análisis estadístico para el coeficiente de transferencia de calor experimental en la etapa de enfriamiento.....  | 108         |
| Anexo 9. Análisis estadístico para la actividad residual de la enzima pectinmetilesterasa.....   | 109         |
| Anexo 10. Análisis estadístico para el porcentaje de retención de fenoles totales.....   | 110         |
| Anexo 11. Análisis estadístico para el porcentaje de retención de actividad antioxidante mediante el ensayo ABTS.....  | 111         |
| Anexo 12. Análisis estadístico para el porcentaje de retención de actividad antioxidante mediante el ensayo FRAP.....  | 112         |
| Anexo 13. Cálculos para la determinación del coeficientes interno de transferencia de calor considerando una menor viscosidad por efecto de las placas raspadoras..... | 113         |

## Anexo 1

## Resultados de viscosidad a 20°C.

| Meas. Pts. | Shear Rate<br>[1/s] | Shear Stress<br>[Pa] | Viscosity<br>[Pa·s] | Speed<br>[1/min] | Torque<br>[μNm] | Status<br>[ ] |
|------------|---------------------|----------------------|---------------------|------------------|-----------------|---------------|
| 1          | 0.000951            | 0.447                | 470                 | 0.000364         | 10.9            | TGC,Dy_       |
| 2          | 0.0013              | 1.03                 | 790                 | 0.000497         | 25.1            | TGC,Dy_       |
| 3          | 0.00175             | 1.67                 | 952                 | 0.000671         | 40.8            | TGC,Dy_       |
| 4          | 0.00233             | 2.34                 | 1,000               | 0.00089          | 57.2            | TGC,Dy_       |
| 5          | 0.00309             | 3.06                 | 992                 | 0.00118          | 74.8            | TGC,Dy_       |
| 6          | 0.00409             | 3.79                 | 926                 | 0.00157          | 92.6            | TGC,Dy_       |
| 7          | 0.00542             | 4.45                 | 821                 | 0.00207          | 109             | TGC,Dy_       |
| 8          | 0.0072              | 4.98                 | 692                 | 0.00275          | 122             | TGC,Dy_       |
| 9          | 0.00954             | 5.38                 | 564                 | 0.00365          | 131             | TGC,Dy_       |
| 10         | 0.0126              | 5.58                 | 441                 | 0.00484          | 136             | TGC,Dy_       |
| 11         | 0.0168              | 5.54                 | 330                 | 0.00641          | 135             | TGC,Dy_       |
| 12         | 0.0222              | 5.38                 | 242                 | 0.0085           | 132             | TGC,Dy_       |
| 13         | 0.0295              | 5.18                 | 176                 | 0.0113           | 126             | TGC,Dy_       |
| 14         | 0.0391              | 4.97                 | 127                 | 0.0149           | 121             | TGC,Dy_       |
| 15         | 0.0518              | 4.76                 | 92                  | 0.0198           | 116             | TGC,Dy_       |
| 16         | 0.0687              | 4.63                 | 67.4                | 0.0263           | 113             | TGC,Dy_       |
| 17         | 0.091               | 4.57                 | 50.2                | 0.0348           | 112             | TGC,Dy_       |
| 18         | 0.121               | 4.55                 | 37.7                | 0.0462           | 111             | TGC,Dy_       |
| 19         | 0.16                | 4.65                 | 29.4                | 0.0612           | 115             | TGC,Dy_       |
| 20         | 0.212               | 4.72                 | 22.1                | 0.0811           | 114             | TGC,Dy_       |
| 21         | 0.281               | 4.78                 | 16.9                | 0.108            | 116             | TGC,Dy_       |
| 22         | 0.373               | 4.81                 | 13.2                | 0.143            | 121             | TGC,Dy_       |
| 23         | 0.494               | 4.85                 | 10                  | 0.189            | 121             | TGC,Dy_       |
| 24         | 0.655               | 5.06                 | 7.72                | 0.251            | 124             | TGC,Dy_       |
| 25         | 0.868               | 5.12                 | 5.93                | 0.332            | 126             | TGC,Dy_       |
| 26         | 1.15                | 5.21                 | 4.76                | 0.44             | 134             | TGC,Dy_       |
| 27         | 1.53                | 5.69                 | 3.79                | 0.584            | 141             | TGC,Dy_       |
| 28         | 2.02                | 6.12                 | 3.07                | 0.774            | 152             | TGC,Dy_       |
| 29         | 2.68                | 6.47                 | 2.55                | 1.03             | 167             | TGC,Dy_       |
| 30         | 3.56                | 6.67                 | 1.85                | 1.36             | 160             | TGC,Dy_       |
| 31         | 4.71                | 6.95                 | 1.42                | 1.8              | 163             | TGC,Dy_       |
| 32         | 6.25                | 7.27                 | 1.16                | 2.39             | 178             | TGC,Dy_       |
| 33         | 8.29                | 7.59                 | 0.955               | 3.17             | 193             | TGC,Dy_       |
| 34         | 11                  | 7.89                 | 0.745               | 4.2              | 200             | TGC,Dy_       |
| 35         | 14.6                | 8.01                 | 0.579               | 5.57             | 206             | TGC,Dy_       |
| 36         | 19.3                | 8.39                 | 0.465               | 7.38             | 219             | TGC,Dy_       |
| 37         | 25.6                | 8.69                 | 0.382               | 9.79             | 239             | TGC,Dy_       |
| 38         | 33.9                | 8.99                 | 0.307               | 13               | 255             | TGC,Dy_       |

---

---

|    |       |       |        |      |     |         |
|----|-------|-------|--------|------|-----|---------|
| 39 | 45    | 9.29  | 0.222  | 17.2 | 244 | TGC,Dy_ |
| 40 | 59.6  | 9.52  | 0.172  | 22.8 | 250 | TGC,Dy_ |
| 41 | 79.1  | 9.82  | 0.132  | 30.2 | 255 | TGC,Dy_ |
| 42 | 105   | 10.25 | 0.0937 | 40.1 | 240 | TGC,Dy_ |
| 43 | 139   | 10.51 | 0.069  | 53.1 | 234 | TGC,Dy_ |
| 44 | 184   | 10.91 | 0.0536 | 70.5 | 241 | TGC,Dy_ |
| 45 | 244   | 11.35 | 0.0414 | 93.4 | 247 | TGC,Dy_ |
| 46 | 324   | 11.76 | 0.0298 | 124  | 236 | TGC,Dy_ |
| 47 | 429   | 12.15 | 0.0232 | 164  | 243 | TGC,Dy_ |
| 48 | 569   | 12.72 | 0.0188 | 218  | 261 | TGC,Dy_ |
| 49 | 754   | 12.1  | 0.0161 | 288  | 296 | TGC,Dy_ |
| 50 | 1,000 | 14.6  | 0.0146 | 382  | 356 | TGC,Dy_ |

---

---

## Anexo 2

## Resultados de viscosidad a 40°C

| Meas. Pts. | Shear Rate<br>[1/s] | Shear Stress<br>[Pa] | Viscosity<br>[Pa·s] | Speed<br>[1/min] | Torque<br>[μNm] | Status<br>[] |
|------------|---------------------|----------------------|---------------------|------------------|-----------------|--------------|
| 1          | 0.00076             | 3.13                 | 4,120               | 0.000291         | 76.5            | TGC,Dy_      |
| 2          | 0.00134             | 9.2                  | 6,850               | 0.000514         | 225             | TGC,Dy_      |
| 3          | 0.00178             | 14.6                 | 8,210               | 0.000681         | 357             | TGC,Dy_      |
| 4          | 0.00235             | 20.2                 | 8,570               | 0.0009           | 493             | TGC,Dy_      |
| 5          | 0.0031              | 25.7                 | 8,280               | 0.00119          | 628             | TGC,Dy_      |
| 6          | 0.0041              | 31.4                 | 7,680               | 0.00157          | 768             | TGC,Dy_      |
| 7          | 0.00544             | 37.4                 | 6,870               | 0.00208          | 914             | TGC,Dy_      |
| 8          | 0.0072              | 43.3                 | 6,010               | 0.00276          | 1,060           | TGC,Dy_      |
| 9          | 0.00953             | 48.6                 | 5,110               | 0.00364          | 1,190           | TGC,Dy_      |
| 10         | 0.0126              | 52.5                 | 4,150               | 0.00484          | 1,280           | TGC,Dy_      |
| 11         | 0.0168              | 54.3                 | 3,230               | 0.00642          | 1,330           | TGC,Dy_      |
| 12         | 0.0222              | 53                   | 2,390               | 0.0085           | 1,300           | TGC,Dy_      |
| 13         | 0.0295              | 50.9                 | 1,730               | 0.0113           | 1,240           | TGC,Dy_      |
| 14         | 0.0391              | 46.4                 | 1,190               | 0.0149           | 1,130           | TGC,Dy_      |
| 15         | 0.0518              | 43.6                 | 843                 | 0.0198           | 1,070           | TGC,Dy_      |
| 16         | 0.0686              | 42.8                 | 624                 | 0.0263           | 1,050           | TGC,Dy_      |
| 17         | 0.091               | 39.9                 | 438                 | 0.0348           | 974             | TGC,Dy_      |
| 18         | 0.121               | 22.7                 | 188                 | 0.0462           | 947             | TGC,Dy_      |
| 19         | 0.16                | 23.2                 | 145                 | 0.0612           | 968             | TGC,Dy_      |
| 20         | 0.212               | 24.1                 | 114                 | 0.0811           | 943             | TGC,Dy_      |
| 21         | 0.281               | 25.2                 | 89.68               | 0.108            | 938             | TGC,Dy_      |
| 22         | 0.373               | 26.6                 | 71.31               | 0.143            | 941             | TGC,Dy_      |
| 23         | 0.494               | 27.8                 | 56.28               | 0.189            | 962             | TGC,Dy_      |
| 24         | 0.655               | 28.1                 | 42.90               | 0.251            | 990             | TGC,Dy_      |
| 25         | 0.869               | 29.3                 | 33.72               | 0.332            | 995             | TGC,Dy_      |
| 26         | 1.15                | 30.4                 | 26.43               | 0.44             | 1,030           | TGC,Dy_      |
| 27         | 1.53                | 31.5                 | 20.59               | 0.584            | 1,060           | TGC,Dy_      |
| 28         | 2.02                | 32.1                 | 15.89               | 0.774            | 1,080           | TGC,Dy_      |
| 29         | 2.68                | 33.4                 | 12.46               | 1.03             | 1,110           | TGC,Dy_      |
| 30         | 3.56                | 34.8                 | 9.78                | 1.36             | 1,190           | TGC,Dy_      |
| 31         | 4.71                | 35.5                 | 7.54                | 1.8              | 1,310           | TGC,Dy_      |
| 32         | 6.25                | 36.1                 | 5.78                | 2.39             | 1,430           | TGC,Dy_      |
| 33         | 8.29                | 37.3                 | 4.50                | 3.17             | 1,470           | TGC,Dy_      |
| 34         | 11                  | 38.1                 | 3.46                | 4.2              | 1,570           | TGC,Dy_      |
| 35         | 14.6                | 39                   | 2.67                | 5.57             | 1,640           | TGC,Dy_      |
| 36         | 19.3                | 40.9                 | 2.12                | 7.39             | 1,680           | TGC,Dy_      |
| 37         | 25.6                | 41.4                 | 1.62                | 9.79             | 1,610           | TGC,Dy_      |
| 38         | 33.9                | 42.6                 | 1.26                | 13               | 1,630           | TGC,Dy_      |

---

---

|    |       |       |       |      |       |         |
|----|-------|-------|-------|------|-------|---------|
| 39 | 45    | 43.9  | 0.98  | 17.2 | 1,460 | TGC,Dy_ |
| 40 | 59.6  | 44.7  | 0.750 | 22.8 | 1,350 | TGC,Dy_ |
| 41 | 79.1  | 45.9  | 0.580 | 30.2 | 1,290 | TGC,Dy_ |
| 42 | 105   | 47.8  | 0.455 | 40.1 | 1,320 | TGC,Dy_ |
| 43 | 139   | 48.9  | 0.352 | 53.2 | 1,490 | TGC,Dy_ |
| 44 | 184   | 50.1  | 0.272 | 70.5 | 1,210 | TGC,Dy_ |
| 45 | 244   | 51.7  | 0.212 | 93.4 | 994   | TGC,Dy_ |
| 46 | 324   | 53.3  | 0.165 | 124  | 1,010 | TGC,Dy_ |
| 47 | 429   | 54.2  | 0.126 | 164  | 1,080 | TGC,Dy_ |
| 48 | 569   | 55.8  | 0.098 | 218  | 1,090 | TGC,Dy_ |
| 49 | 754   | 117.5 | 0.156 | 289  | 1,160 | TGC,Dy_ |
| 50 | 1,000 | 122.4 | 0.122 | 383  | 1,400 | TGC,Dy_ |

---

---

### Anexo 3

#### Cálculos para la determinación del coeficiente interno de transferencia de calor experimental para el tratamiento 1.

La determinación de este coeficiente ( $h_e$ ) en la pared interna del intercambiador se llevó a cabo de la siguiente forma:

- I. El cálculo de la temperatura promedio de la pared interna y del producto se realizó con la ecuación (1) y (2).

$$t_w = \frac{\left( \frac{t_1 + t_2}{2} + \frac{T_1 + T_2}{2} \right)}{2} \quad (1)$$

$$t_m = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (2)$$

En seguida se muestran los datos del primer tratamiento para determinar la temperatura promedio del medio de calentamiento (aceite) y la temperatura promedio del producto (puré de guayaba) para la etapa de calentamiento.

| Tratamiento | t1 (°C) | t2 (°C) | FA(mL/min) | VRR(rpm) | TC(°C) | T1 (°C) | T1 (°C) |
|-------------|---------|---------|------------|----------|--------|---------|---------|
| 1           | 145.4   | 143.2   | 200        | 100      | 145    | 20      | 87.4    |

FA: Flujo de alimentación, VRR: Velocidad de rotación de raspadores, TC: Temperatura del medio de calentamiento

$$t_w = \frac{\left( \frac{145.4 + 143.2}{2} + \frac{20 + 87.4}{2} \right)}{2} = 99.00^\circ\text{C}$$

$$t_m = \frac{20 + 87.4}{2} = 53.7^\circ\text{C}$$

- II. Para determinar los coeficientes se utilizaron las ecuaciones (3) y (4)

$$Q = m \cdot Cp \cdot (T_1 - T_2) \quad (3)$$

$$h = Q / A \cdot (t_m - t_w) \quad (4)$$

Dónde:

$Q$  = Calor ganado por el producto a su paso por el intercambiador de calor (Watts)

$m$  = Flujo másico, determinado de la siguiente manera;

$$m = \rho \cdot v = (1045 \text{ kg/m}^3) \cdot (0.0002 \text{ m}^3/\text{min}) = 0.209 \text{ kg/min}$$

Dónde:

$C_p$  = Capacidad calorífica = 3777.08 J/Kg°C

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor en la pared interna del intercambiador de calor (W/m<sup>2</sup>°C)

$A$  = Área de transferencia de calor en la longitud interna del intercambiador de calor (m<sup>2</sup>)

$$A = \pi \cdot D \cdot L = (3.1416) \cdot (0.0472 \text{ m}) \cdot (0.415 \text{ m}) = 0.0615 \text{ m}^2$$

Por lo tanto de acuerdo a las ecuaciones (3) y (4) se tiene:

$$Q = (0.209 \text{ kg/min}) \cdot (3777.08 \text{ J/kg}^\circ\text{C}) \cdot (20 - 87.4) = 53206.22 \text{ J/min} = 886.72 \text{ Watts}$$

$$h = 886.72 / (0.0615 \text{ m}^2) \cdot (99.00 - 53.7) = 318.09 \text{ Watts/m}^2\text{°C}$$

Para determinar cada uno de los coeficientes internos de transferencia de calor experimental se aplicó esta metodología utilizando una hoja de cálculo.

## Anexo 4

### Cálculos para la determinación del coeficiente interno de transferencia de calor teórico para el tratamiento 1.

La determinación de este coeficiente se efectuó aplicando la ecuación de Skelland (Ecuación 1).

$$\frac{hD}{K} = \alpha \left( \frac{C_p \mu}{K} \right)^\beta \left( \frac{D - D_s V \rho}{\mu} \right)^{1.0} \left( \frac{DN}{V} \right)^{0.62} \left( \frac{D_s}{D} \right)^{0.55} (n_B)^{0.53} \quad (1)$$

Los datos cubren un intervalo de velocidades de flujo axial de 0.076 a 0.038 m/min y velocidades de rotación entre 100 y 750 rpm.

Dónde:

|          |   |
|----------|---|
| $\alpha$ | Coficiente experimental para fluidos no newtonianos, 0.014                      |
| $\beta$  | Constante experimental para fluidos no newtonianos, 0.96                        |
| $C_p$    | Capacidad calorífica = 3777.08 J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>             |
| $\mu$    | Viscosidad efectiva del fluido = 33 Pa·s <sup>-1</sup>                          |
| $K$      | Conductividad térmica = 0.5808 W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup>              |
| $D$      | Diámetro interno del recipiente = 0.0472 m                                      |
| $D_s$    | Diámetro del eje giratorio = 0.0257 m   |
| $V$      | Velocidad axial del flujo del líquido = 0.002708 m·s <sup>-1</sup>              |
| $\rho$   | Densidad del fluido = 1045 kg·m <sup>-3</sup>                                   |
| $N$      | Velocidad de rotación de raspadores = 1.66 rev·s <sup>-1</sup>                  |
| $n_B$    | Número de raspadores = 2  |
| $h$      | Coficiente interno de transferencia de calor experimental, W/m <sup>2</sup> ·°C |

Por lo tanto, despejando la Ecuación 2, tenemos:

$$h = \frac{\alpha \left( \frac{C_p \mu}{K} \right)^\beta \left( \frac{D - D_s V \rho}{\mu} \right)^{1.0} \left( \frac{DN}{V} \right)^{0.62} \left( \frac{D_s}{D} \right)^{0.55} (n_B)^{0.53}}{D} \cdot K$$

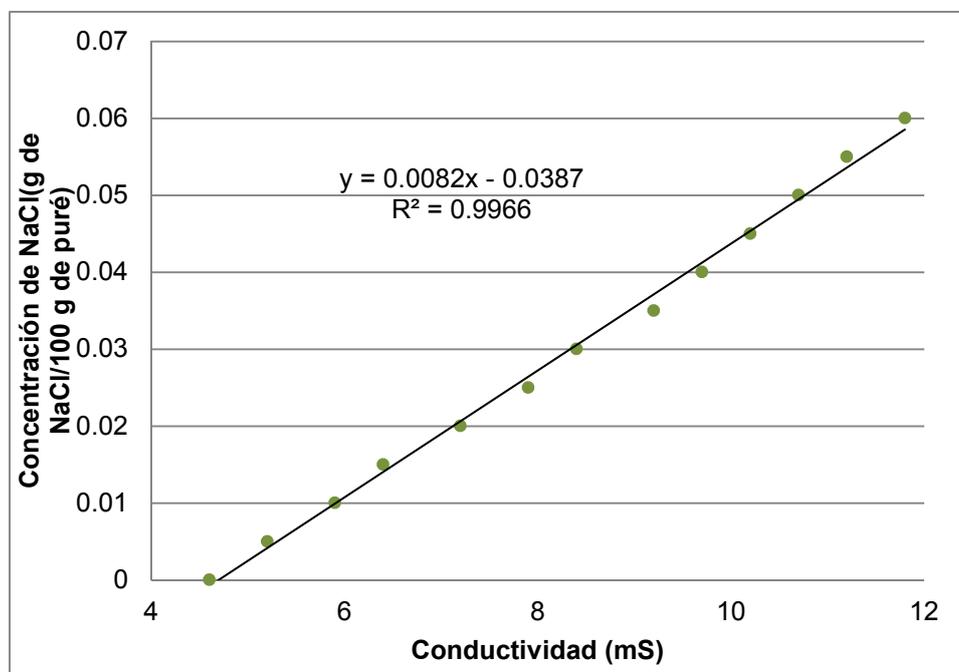
Ahora sustituyendo los valores:

$$h = \frac{0.014 \left( \frac{3777.08 \cdot 33}{0.5808} \right)^{0.96} \left( \frac{(0.0472 - 0.0257) \cdot (0.002708) \cdot (1045)}{33} \right)^{1.0} \left( \frac{0.0472 \cdot (1.66)}{0.002708} \right)^{0.62} \left( \frac{0.0257}{0.0472} \right)^{0.55} (2)^{0.53}}{0.0472} \cdot (0.5808)$$

$$h = 405.96 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{°C}$$

## Anexo 5

Curva tipo de concentración de NaCl contra conductividad de la muestra para 10g de puré de guayaba con NaCl de 0 a 0.5g.



## Anexo 6

### Análisis estadístico para el coeficiente de transferencia de calor experimental en la etapa de calentamiento.

Efectos y coeficientes estimados para CTCE1 (unidades codificadas)

| Término   | Efecto | Coef   | SE Coef | T      | P     |
|-----------|--------|--------|---------|--------|-------|
| Constante |        | 341.59 | 0.7977  | 428.23 | 0.000 |
| FA        | 85.10  | 42.55  | 0.7977  | 53.34  | 0.000 |
| VRR       | -19.38 | -9.69  | 0.7977  | -12.15 | 0.000 |
| TC        | -20.61 | -10.30 | 0.7977  | -12.92 | 0.000 |
| FA*VRR    | 4.37   | 2.18   | 0.7977  | 2.74   | 0.021 |
| FA*TC     | -28.24 | -14.12 | 0.7977  | -17.70 | 0.000 |
| VRR*TC    | 27.10  | 13.55  | 0.7977  | 16.99  | 0.000 |
| FA*VRR*TC | 7.62   | 3.81   | 0.7977  | 4.77   | 0.001 |
| Pt Ctral  |        | 33.23  | 2.0075  | 16.55  | 0.000 |

S = 3.19072      PRESS = 4087.54  
 R-cuad. = 99.75%      R-cuad.(pred.) = 90.15%      R-cuad.(ajustado) = 99.56%

Análisis de varianza para CTCE1 (unidades codificadas)

| Fuente                            | GL | SC Sec. | SC Ajust. | CM Ajust. | F       |
|-----------------------------------|----|---------|-----------|-----------|---------|
| Efectos principales               | 3  | 32168.7 | 32168.7   | 10722.9   | 1053.25 |
| FA                                | 1  | 28967.7 | 28967.7   | 28967.7   | 2845.35 |
| VRR                               | 1  | 1502.4  | 1502.4    | 1502.4    | 147.58  |
| TC                                | 1  | 1698.5  | 1698.5    | 1698.5    | 166.84  |
| 2-Interacciones de (No.) factores | 3  | 6204.0  | 6204.0    | 2068.0    | 203.13  |
| FA*VRR                            | 1  | 76.3    | 76.3      | 76.3      | 7.50    |
| FA*TC                             | 1  | 3190.2  | 3190.2    | 3190.2    | 313.35  |
| VRR*TC                            | 1  | 2937.5  | 2937.5    | 2937.5    | 288.53  |
| 3-Interacciones de (No.) factores | 1  | 232.1   | 232.1     | 232.1     | 22.79   |
| FA*VRR*TC                         | 1  | 232.1   | 232.1     | 232.1     | 22.79   |
| Curvatura                         | 1  | 2789.7  | 2789.7    | 2789.7    | 274.02  |
| Error residual                    | 10 | 101.8   | 101.8     | 10.2      |         |
| Error puro                        | 10 | 101.8   | 101.8     | 10.2      |         |
| Total                             | 18 | 41496.2 |           |           |         |

P  
 0.000  
 0.000  
 0.000  
 0.000  
 0.000  
 0.021  
 0.000  
 0.000  
 0.001  
 0.001  
 0.000

Coeficientes estimados para CTCE1 utilizando datos en unidades no codificadas

| Término   | Coef        |
|-----------|-------------|
| Constante | -627.825    |
| FA        | 6.34260     |
| VRR       | -0.399909   |
| TC        | 5.77420     |
| FA*VRR    | -0.00560327 |
| FA*TC     | -0.0396658  |
| VRR*TC    | 0.00212462  |
| FA*VRR*TC | 3.80832E-05 |
| Pt Ctral  | 33.2303     |

## Anexo 7

### Análisis estadístico para el coeficiente de transferencia de calor experimental en la etapa de pre-enfriamiento.

Efectos y coeficientes estimados para CTCE2 (unidades codificadas)

| Término   | Efecto | Coef   | SE Coef | T      | P     |
|-----------|--------|--------|---------|--------|-------|
| Constante |        | 206.75 | 0.5867  | 352.37 | 0.000 |
| FA        | 40.81  | 20.40  | 0.5867  | 34.78  | 0.000 |
| VRR       | 15.37  | 7.69   | 0.5867  | 13.10  | 0.000 |
| TC        | 2.44   | 1.22   | 0.5867  | 2.08   | 0.065 |
| FA*VRR    | 7.65   | 3.82   | 0.5867  | 6.52   | 0.000 |
| FA*TC     | 27.53  | 13.76  | 0.5867  | 23.46  | 0.000 |
| VRR*TC    | -17.23 | -8.62  | 0.5867  | -14.69 | 0.000 |
| FA*VRR*TC | -10.67 | -5.33  | 0.5867  | -9.09  | 0.000 |
| Pt Ctral  |        | -17.98 | 1.4766  | -12.17 | 0.000 |

S = 2.34696      PRESS = 1303.94  
R-cuad. = 99.59%      R-cuad.(pred.) = 90.28%      R-cuad.(ajustado) = 99.26%

Análisis de varianza para CTCE2 (unidades codificadas)

| Fuente                            | GL | SC Sec. | SC Ajust. | CM Ajust. | F       |
|-----------------------------------|----|---------|-----------|-----------|---------|
| Efectos principales               | 3  | 7630.2  | 7630.22   | 2543.41   | 461.75  |
| FA                                | 1  | 6661.2  | 6661.18   | 6661.18   | 1209.32 |
| VRR                               | 1  | 945.3   | 945.29    | 945.29    | 171.62  |
| TC                                | 1  | 23.7    | 23.74     | 23.74     | 4.31    |
| 2-Interacciones de (No.) factores | 3  | 4453.3  | 4453.31   | 1484.44   | 269.49  |
| FA*VRR                            | 1  | 234.1   | 234.08    | 234.08    | 42.50   |
| FA*TC                             | 1  | 3031.1  | 3031.14   | 3031.14   | 550.29  |
| VRR*TC                            | 1  | 1188.1  | 1188.09   | 1188.09   | 215.69  |
| 3-Interacciones de (No.) factores | 1  | 455.2   | 455.24    | 455.24    | 82.65   |
| FA*VRR*TC                         | 1  | 455.2   | 455.24    | 455.24    | 82.65   |
| Curvatura                         | 1  | 816.5   | 816.48    | 816.48    | 148.23  |
| Error residual                    | 10 | 55.1    | 55.08     | 5.51      |         |
| Error puro                        | 10 | 55.1    | 55.08     | 5.51      |         |
| Total                             | 18 | 13410.3 |           |           |         |

P  
0.000  
0.000  
0.000  
0.065  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000

Coeficientes estimados para CTCE2 utilizando datos en unidades no codificadas

| Término   | Coef         |
|-----------|--------------|
| Constante | 1685.76      |
| FA        | -6.38287     |
| VRR       | -1.12672     |
| TC        | 10.2303      |
| FA*VRR    | 0.00819241   |
| FA*TC     | 0.0435302    |
| VRR*TC    | 0.00738516   |
| FA*VRR*TC | -5.33411E-05 |
| Pt Ctral  | -17.9774     |

## Anexo 8

### Análisis estadístico para el coeficiente de transferencia de calor experimental en la etapa de enfriamiento.

Efectos y coeficientes estimados para CTCE3 (unidades codificadas)

| Término   | Efecto | Coef   | SE Coef | T      | P     |
|-----------|--------|--------|---------|--------|-------|
| Constante |        | 503.06 | 1.153   | 436.29 | 0.000 |
| FA        | 322.25 | 161.12 | 1.153   | 139.74 | 0.000 |
| VRR       | -0.24  | -0.12  | 1.153   | -0.11  | 0.918 |
| TC        | -34.88 | -17.44 | 1.153   | -15.13 | 0.000 |
| FA*VRR    | -1.16  | -0.58  | 1.153   | -0.50  | 0.625 |
| FA*TC     | -15.45 | -7.72  | 1.153   | -6.70  | 0.000 |
| VRR*TC    | 20.35  | 10.17  | 1.153   | 8.82   | 0.000 |
| FA*VRR*TC | 36.89  | 18.44  | 1.153   | 16.00  | 0.000 |
| Pt Ctral  |        | -8.20  | 2.902   | -2.82  | 0.018 |

S = 4.61215      PRESS = 1037.23  
 R-cuad. = 99.95%      R-cuad.(pred.) = 99.76%      R-cuad.(ajustado) = 99.91%

Análisis de varianza para CTCE3 (unidades codificadas)

| Fuente                            | GL | SC Sec. | SC Ajust. | CM Ajust. | F        |
|-----------------------------------|----|---------|-----------|-----------|----------|
| Efectos principales               | 3  | 420244  | 420244    | 140081    | 6585.25  |
| FA                                | 1  | 415376  | 415376    | 415376    | 19526.94 |
| VRR                               | 1  | 0       | 0         | 0         | 0.01     |
| TC                                | 1  | 4867    | 4867      | 4867      | 228.81   |
| 2-Interacciones de (No.) factores | 3  | 2616    | 2616      | 872       | 40.99    |
| FA*VRR                            | 1  | 5       | 5         | 5         | 0.25     |
| FA*TC                             | 1  | 954     | 954       | 954       | 44.87    |
| VRR*TC                            | 1  | 1656    | 1656      | 1656      | 77.84    |
| 3-Interacciones de (No.) factores | 1  | 5442    | 5442      | 5442      | 255.84   |
| FA*VRR*TC                         | 1  | 5442    | 5442      | 5442      | 255.84   |
| Curvatura                         | 1  | 170     | 170       | 170       | 7.98     |
| Error residual                    | 10 | 213     | 213       | 21        |          |
| Error puro                        | 10 | 213     | 213       | 21        |          |
| Total                             | 18 | 428684  |           |           |          |

P  
 0.000  
 0.000  
 0.0918  
 0.000  
 0.000  
 0.625  
 0.000  
 0.000  
 0.000  
 0.000  
 0.000  
 0.000  
 0.018

Coeficientes estimados para CTCE3 utilizando datos en unidades no codificadas

| Término   | Coef        |
|-----------|-------------|
| Constante | -2186.63    |
| FA        | 12.2363     |
| VRR       | 6.78152     |
| TC        | 14.6925     |
| FA*VRR    | -0.0276936  |
| FA*TC     | -0.0707757  |
| VRR*TC    | -0.0451560  |
| FA*VRR*TC | 0.000184430 |
| Pt Ctral  | -8.19500    |

## Anexo 9

## Análisis estadístico para la actividad residual de la enzima pectinmetilesterasa.

Efectos y coeficientes estimados para PME (unidades codificadas)

| Término   | Efecto | Coef   | SE Coef | T       | P     |
|-----------|--------|--------|---------|---------|-------|
| Constante |        | 4.615  | 0.01301 | 354.67  | 0.000 |
| FA        | 3.197  | 1.598  | 0.01301 | 122.83  | 0.000 |
| VRR       | -0.063 | -0.031 | 0.01301 | -2.41   | 0.037 |
| TC        | -2.909 | -1.455 | 0.01301 | -111.78 | 0.000 |
| FA*VRR    | -0.010 | -0.005 | 0.01301 | -0.37   | 0.716 |
| FA*TC     | 3.047  | 1.523  | 0.01301 | 117.07  | 0.000 |
| VRR*TC    | 0.022  | 0.011  | 0.01301 | 0.85    | 0.413 |
| FA*VRR*TC | -0.035 | -0.017 | 0.01301 | -1.34   | 0.211 |
| Pt Ctral  |        | 0.695  | 0.03275 | 21.21   | 0.000 |

S = 0.0520519      PRESS = 1.68606  
R-cuad. = 99.98%      R-cuad.(pred.) = 98.51%      R-cuad.(ajustado) = 99.96%

Análisis de varianza para PME (unidades codificadas)

| Fuente                            | GL | SC Sec. | SC Ajust. | CM Ajust. | F        |
|-----------------------------------|----|---------|-----------|-----------|----------|
| Efectos principales               | 3  | 74.748  | 74.7475   | 24.9158   | 9196.07  |
| FA                                | 1  | 40.877  | 40.8768   | 40.8768   | 15087.05 |
| VRR                               | 1  | 0.016   | 0.0158    | 0.0158    | 5.81     |
| TC                                | 1  | 33.855  | 33.8549   | 33.8549   | 12495.37 |
| 2-Interacciones de (No.) factores | 3  | 37.133  | 37.1331   | 12.3777   | 4568.43  |
| FA*VRR                            | 1  | 0.000   | 0.0004    | 0.0004    | 0.14     |
| FA*TC                             | 1  | 37.131  | 37.1307   | 37.1307   | 13704.42 |
| VRR*TC                            | 1  | 0.002   | 0.0020    | 0.0020    | 0.73     |
| 3-Interacciones de (No.) factores | 1  | 0.005   | 0.0048    | 0.0048    | 1.78     |
| FA*VRR*TC                         | 1  | 0.005   | 0.0048    | 0.0048    | 1.78     |
| Curvatura                         | 1  | 1.219   | 1.2190    | 1.2190    | 449.90   |
| Error residual                    | 10 | 0.027   | 0.0271    | 0.0027    |          |
| Error puro                        | 10 | 0.027   | 0.0271    | 0.0027    |          |
| Total                             | 18 | 113.132 |           |           |          |

P  
0.000  
0.000  
0.037  
0.000  
0.000  
0.716  
0.000  
0.413  
0.211  
0.211  
0.000

Coeficientes estimados para PME utilizando datos en unidades no codificadas

| Término   | Coef         |
|-----------|--------------|
| Constante | 183.434      |
| FA        | -0.448774    |
| VRR       | -0.00957125  |
| TC        | -1.22392     |
| FA*VRR    | 2.58188E-05  |
| FA*TC     | 0.00309887   |
| VRR*TC    | 6.32500E-05  |
| FA*VRR*TC | -1.73750E-07 |
| Pt Ctral  | 0.694625     |

## Anexo 10

### Análisis estadístico para el porcentaje de retención de fenoles totales.

Efectos y coeficientes estimados para FT (unidades codificadas)

| Término   | Efecto | Coef   | SE Coef | T       | P     |
|-----------|--------|--------|---------|---------|-------|
| Constante |        | 80.353 | 0.03762 | 2135.88 | 0.000 |
| FA        | 3.314  | 1.657  | 0.03762 | 44.04   | 0.000 |
| VRR       | -4.309 | -2.154 | 0.03762 | -57.27  | 0.000 |
| TC        | -6.526 | -3.263 | 0.03762 | -86.74  | 0.000 |
| FA*VRR    | -0.451 | -0.226 | 0.03762 | -6.00   | 0.000 |
| FA*TC     | -0.044 | -0.022 | 0.03762 | -0.58   | 0.574 |
| VRR*TC    | 3.459  | 1.729  | 0.03762 | 45.97   | 0.000 |
| FA*VRR*TC | -0.249 | -0.124 | 0.03762 | -3.31   | 0.008 |
| Pt Ctral  |        | 2.067  | 0.09468 | 21.83   | 0.000 |

S = 0.150483      PRESS = 15.2745  
 R-cuad. = 99.94%      R-cuad.(pred.) = 95.62%      R-cuad.(ajustado) = 99.88%

Análisis de varianza para FT (unidades codificadas)

| Fuente                            | GL | SC Sec. | SC Ajust. | CM Ajust. | F       |
|-----------------------------------|----|---------|-----------|-----------|---------|
| Efectos principales               | 3  | 288.553 | 288.553   | 96.184    | 4247.48 |
| FA                                | 1  | 43.924  | 43.924    | 43.924    | 1939.67 |
| VRR                               | 1  | 74.261  | 74.261    | 74.261    | 3279.37 |
| TC                                | 1  | 170.368 | 170.368   | 170.368   | 7523.42 |
| 2-Interacciones de (No.) factores | 3  | 48.674  | 48.674    | 16.225    | 716.48  |
| FA*VRR                            | 1  | 0.815   | 0.815     | 0.815     | 35.97   |
| FA*TC                             | 1  | 0.008   | 0.008     | 0.008     | 0.34    |
| VRR*TC                            | 1  | 47.852  | 47.852    | 47.852    | 2113.13 |
| 3-Interacciones de (No.) factores | 1  | 0.248   | 0.248     | 0.248     | 10.93   |
| FA*VRR*TC                         | 1  | 0.248   | 0.248     | 0.248     | 10.93   |
| Curvatura                         | 1  | 10.792  | 10.792    | 10.792    | 476.59  |
| Error residual                    | 10 | 0.226   | 0.226     | 0.023     |         |
| Error puro                        | 10 | 0.226   | 0.226     | 0.023     |         |
| Total                             | 18 | 348.493 |           |           |         |

P  
 0.000  
 0.000  
 0.000  
 0.000  
 0.000  
 0.000  
 0.574  
 0.000  
 0.008  
 0.008  
 0.000

Coefficientes estimados para FT utilizando datos en unidades no codificadas

| Término   | Coef         |
|-----------|--------------|
| Constante | 268.136      |
| FA        | -0.0294531   |
| VRR       | -0.322762    |
| TC        | -1.27025     |
| FA*VRR    | 0.000175281  |
| FA*TC     | 0.000329375  |
| VRR*TC    | 0.00210250   |
| FA*VRR*TC | -1.24375E-06 |
| Pt Ctral  | 2.06688      |

## Anexo 11

### Análisis estadístico para el porcentaje de retención de actividad antioxidante mediante el ensayo ABTS.

Efectos y coeficientes estimados para ABTS (unidades codificadas)

| Término   | Efecto | Coef   | SE Coef | T      | P     |
|-----------|--------|--------|---------|--------|-------|
| Constante |        | 79.014 | 0.1462  | 540.50 | 0.000 |
| FA        | 2.664  | 1.332  | 0.1462  | 9.11   | 0.000 |
| VRR       | -4.301 | -2.151 | 0.1462  | -14.71 | 0.000 |
| TC        | -7.034 | -3.517 | 0.1462  | -24.06 | 0.000 |
| FA*VRR    | -0.966 | -0.483 | 0.1462  | -3.30  | 0.008 |
| FA*TC     | -0.974 | -0.487 | 0.1462  | -3.33  | 0.008 |
| VRR*TC    | 3.271  | 1.636  | 0.1462  | 11.19  | 0.000 |
| FA*VRR*TC | -0.069 | -0.034 | 0.1462  | -0.24  | 0.819 |
| Pt Ctral  |        | 2.659  | 0.3679  | 7.23   | 0.000 |

S = 0.584749      PRESS = 30.0323  
R-cuad. = 99.08%      R-cuad.(pred.) = 91.92%      R-cuad.(ajustado) = 98.35%

Análisis de varianza para ABTS (unidades codificadas)

| Fuente                            | GL | SC Sec. | SC Ajust. | CM Ajust. | F      |
|-----------------------------------|----|---------|-----------|-----------|--------|
| Efectos principales               | 3  | 300.280 | 300.280   | 100.093   | 292.73 |
| FA                                | 1  | 28.382  | 28.382    | 28.382    | 83.01  |
| VRR                               | 1  | 74.003  | 74.003    | 74.003    | 216.43 |
| TC                                | 1  | 197.895 | 197.895   | 197.895   | 578.75 |
| 2-Interacciones de (No.) factores | 3  | 50.332  | 50.332    | 16.777    | 49.07  |
| FA*VRR                            | 1  | 3.735   | 3.735     | 3.735     | 10.92  |
| FA*TC                             | 1  | 3.793   | 3.793     | 3.793     | 11.09  |
| VRR*TC                            | 1  | 42.804  | 42.804    | 42.804    | 125.18 |
| 3-Interacciones de (No.) factores | 1  | 0.019   | 0.019     | 0.019     | 0.06   |
| FA*VRR*TC                         | 1  | 0.019   | 0.019     | 0.019     | 0.06   |
| Curvatura                         | 1  | 17.861  | 17.861    | 17.861    | 52.24  |
| Error residual                    | 10 | 3.419   | 3.419     | 0.342     |        |
| Error puro                        | 10 | 3.419   | 3.419     | 0.342     |        |
| Total                             | 18 | 371.911 |           |           |        |

P  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.008  
0.008  
0.000  
0.819  
0.819  
0.000

Coeficientes estimados para ABTS utilizando datos en unidades no codificadas

| Término   | Coef         |
|-----------|--------------|
| Constante | 216.002      |
| FA        | 0.151159     |
| VRR       | -0.264319    |
| TC        | -0.932875    |
| FA*VRR    | 0.000027406  |
| FA*TC     | -8.70625E-04 |
| VRR*TC    | 0.00173875   |
| FA*VRR*TC | -3.43750E-07 |
| Pt Ctral  | 2.65896      |

## Anexo 12

### Análisis estadístico para el porcentaje de retención de actividad antioxidante mediante el ensayo FRAP.

Efectos y coeficientes estimados para FRAP (unidades codificadas)

| Término   | Efecto | Coef   | SE Coef | T      | P     |
|-----------|--------|--------|---------|--------|-------|
| Constante |        | 78.713 | 0.1164  | 675.94 | 0.000 |
| FA        | 4.138  | 2.069  | 0.1164  | 17.77  | 0.000 |
| VRR       | -4.190 | -2.095 | 0.1164  | -17.99 | 0.000 |
| TC        | -6.137 | -3.069 | 0.1164  | -26.35 | 0.000 |
| FA*VRR    | -0.458 | -0.229 | 0.1164  | -1.96  | 0.078 |
| FA*TC     | 0.390  | 0.195  | 0.1164  | 1.67   | 0.125 |
| VRR*TC    | 3.603  | 1.801  | 0.1164  | 15.47  | 0.000 |
| FA*VRR*TC | -0.070 | -0.035 | 0.1164  | -0.30  | 0.770 |
| Pt Ctral  |        | 2.151  | 0.2931  | 7.34   | 0.000 |

S = 0.465797      PRESS = 19.3718  
R-cuad. = 99.39%      R-cuad.(pred.) = 94.57%      R-cuad.(ajustado) = 98.90%

Análisis de varianza para FRAP (unidades codificadas)

| Fuente                            | GL | SC Sec. | SC Ajust. | CM Ajust. | F      |
|-----------------------------------|----|---------|-----------|-----------|--------|
| Efectos principales               | 3  | 289.376 | 289.376   | 96.459    | 444.58 |
| FA                                | 1  | 68.476  | 68.476    | 68.476    | 315.60 |
| VRR                               | 1  | 70.224  | 70.224    | 70.224    | 323.66 |
| TC                                | 1  | 150.676 | 150.676   | 150.676   | 694.46 |
| 2-Interacciones de (No.) factores | 3  | 53.358  | 53.358    | 17.786    | 81.98  |
| FA*VRR                            | 1  | 0.837   | 0.837     | 0.837     | 3.86   |
| FA*TC                             | 1  | 0.608   | 0.608     | 0.608     | 2.80   |
| VRR*TC                            | 1  | 51.912  | 51.912    | 51.912    | 239.26 |
| 3-Interacciones de (No.) factores | 1  | 0.020   | 0.020     | 0.020     | 0.09   |
| FA*VRR*TC                         | 1  | 0.020   | 0.020     | 0.020     | 0.09   |
| Curvatura                         | 1  | 11.687  | 11.687    | 11.687    | 53.87  |
| Error residual                    | 10 | 2.170   | 2.170     | 0.217     |        |
| Error puro                        | 10 | 2.170   | 2.170     | 0.217     |        |
| Total                             | 18 | 356.610 |           |           |        |

P  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.000  
0.078  
0.125  
0.000  
0.770  
0.770  
0.000

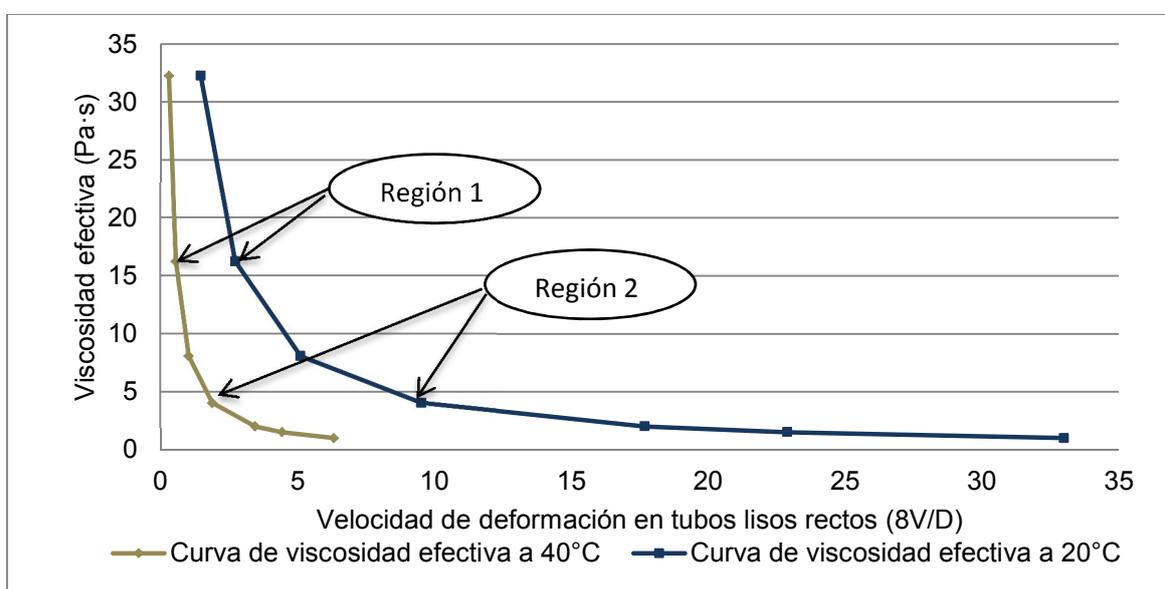
Coeficientes estimados para FRAP utilizando datos en unidades no codificadas

| Término   | Coef         |
|-----------|--------------|
| Constante | 270.013      |
| FA        | -0.0501313   |
| VRR       | -0.292981    |
| TC        | -1.30263     |
| FA*VRR    | 0.000041063  |
| FA*TC     | 0.000495000  |
| VRR*TC    | 0.00190625   |
| FA*VRR*TC | -3.50000E-07 |
| Pt Ctral  | 2.15083      |

## Anexo 13

### Cálculos para la determinación del coeficiente interno de transferencia de calor considerando una menor viscosidad por efecto de las placas raspadoras.

Considerando que los valores de viscosidad determinados en el presente estudio se ubicaron en la región 1, se supusieron valores de viscosidad menores los cuales se situaron en la región 2, es decir, por efecto de las placas raspadoras la viscosidad disminuirá. De manera de ubicar este efecto se construyó la siguiente gráfica (Figura 1).



**Figura 1. Viscosidad efectiva vs 8V/D a 20 y 40 °C.**

Una vez que se obtuvieron los valores de la viscosidad efectiva, se estableció una relación de ecuaciones del tipo Arrhenius (Ec. 1) para poder obtener la viscosidad mediante una corrección por temperatura, por lo tanto se tiene:

$$\frac{\mu_1}{\mu_2} = e^{\frac{E_0}{R} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (1)$$

Donde

$E_0$ : Energía de activación del fluido

$R$ : Constante de los gases

$T$ : Temperatura absoluta en K

$K_0$ : Constante.

---

---

Enseguida aplicando logaritmos naturales y despejando la ( $E_0$ ) de la Ecuación 1 se tiene:

$$E_0 = \frac{\ln \mu_1 - \ln \mu_2}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \cdot (R) \quad (2)$$

Una vez que se conoce el valor de la energía de activación se sustituye en la Ecuación 30, considerando como referencia alguna de las dos viscosidades ( $\mu_1$  ó  $\mu_2$ ) y temperaturas (20 ó 40°C) calculadas previamente, con esta ecuación se podrá calcular la ( $\mu$ ) que haya alcanzado el fluido por efecto de las placas raspadoras.

Finalmente, conociendo la viscosidad se sustituye este valor en la Ecuación de Skelland para conocer el coeficiente interno de transferencia de calor de acuerdo a la metodología del Anexo 4.