



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas

Departamento de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química

**“DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD EN PAPAS  
TIPO *FRENCH FRIES* MEDIANTE VISIÓN COMPUTACIONAL  
Y ESTUDIO DE SUS PROPIEDADES FÍSICAS”**

Memoria para optar al título de Ingeniero en Alimentos

**KATTIRANT PAZ MOYA VASQUINZAY**

Profesor Patrocinante: Msc Andrea Bunger Timmermann  
Directores de Memoria: Msc Andrea Bunger Timmermann  
Dr. Franco Pedreschi Plasencia

Santiago – Chile

2011

LA PRESENTE MEMORIA ES PARTE DEL PROYECTO  
FONDECYT 1070031 TITULADO “DETERMINACIÓN DE LA  
CINÉTICA DE PROCESO Y CALIDAD FINAL EN PAPAS Y  
MANZANAS USANDO VISIÓN COMPUTACIONAL”

*A mi familia, especialmente a mis padres  
y a mi hermano, los pilares de mi vida.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*En primer lugar, agradezco a Dios por darme la vida y la familia que tengo, y por permitirme cumplir mis metas día a día.*

*A mis padres Aldo y Kattirant. Gracias por su amor incondicional, por darme los valores y la formación que tengo, por apoyarme y ayudarme siempre que lo he necesitado, todo lo que soy es gracias a ustedes y es para ustedes. A mi hermano Aldo. Gracias hermano por tu amor, por desearme siempre lo mejor y por ayudarme en todo lo que puedes. A Ricardo, gracias por tu buena voluntad y ayuda sincera. A mi familia, gracias por su confianza.*

*A mis grandes amigos que formaron parte de mi etapa universitaria. Patricio, mi gran amigo, gracias por tu compañía incondicional durante tantos años, por tu constante motivación y apoyo en cada momento. Alejandra, desde el primer día de clases has sido una gran amiga y compañera, gracias por todo. Pía, gracias por enseñarme ese lindo concepto de amistad que tienes y por todo tu apoyo durante este tiempo. Paula, gracias amiga por tu generosidad sincera desde el primer año. Carola, gracias por entregarme tu amistad y confiar en mí. Estefanía, gracias por toda la ayuda y compañía especialmente durante el período de la tesis. A Daniela, Magdalena, María Paz, Cristián y Gonzalo, gracias por cada momento compartido.*

*A Arturo. Tú has sido parte de la última y quizás más complicada etapa de mi memoria. Muchas gracias por ser como eres conmigo, por el amor que me entregas, por tus palabras y por siempre intentar comprenderme.*

*A mi Directora de Tesis y Profesora Patrocinante, Andrea Bunger, por su constante apoyo, confianza y paciencia. Al Profesor Franco Pedreschi por la confianza depositada desde un comienzo, y al Profesor Domingo Mery, por su buena disposición y conocimientos entregados.*

*Finalmente expreso mis agradecimientos al Proyecto FONDECYT N° 1070031 por el financiamiento otorgado para la realización de esta memoria y a todas aquellas personas de la Universidad de Santiago de Chile que me ayudaron de una u otra forma, especialmente a Silvia Matiacevich.*

## INDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>xiv</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>xvi</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes Bibliográficos.....	2
1.1.1 Materia Prima: La Papa .....	2
1.1.2 Papas tipo <i>French Fries</i> .....	2
1.1.3 Proceso de fritura .....	3
1.1.4 Pretratamientos aplicados a los procesos de fritura.....	5
1.1.4.1 Escaldado.....	5
1.1.4.2 Escaldado - Secado .....	6
1.1.5 Evolución de parámetros físicos durante la fritura .....	7
1.1.5.1 Contenido de Aceite .....	7
1.1.5.2 Textura .....	8
1.1.5.3 Color.....	9
1.1.6 Visión Computacional .....	10
1.1.6.1 Adquisición de imagen.....	10
1.1.6.2 Pre-procesamiento de imagen.....	11
1.1.6.3 Segmentación de imagen .....	11
1.1.6.4 Extracción de características .....	11
1.1.6.5 Clasificación .....	12
1.1.7 Análisis Sensorial .....	12
1.2 Hipótesis de Trabajo.....	13
1.3 Objetivos .....	14
1.3.1 Objetivo General.....	14
1.3.2 Objetivos Específicos .....	14

<b>2</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>15</b>
2.1	Recepción y selección de Materias Primas	16
2.1.1	Papas	16
2.1.2	Aceite	16
2.2	Elaboración de Muestras	16
2.2.1	Lavado	16
2.2.2	Pelado y lavado	16
2.2.3	Corte y selección	17
2.2.4	Pretratamiento	17
2.2.4.1	Control	17
2.2.4.2	Escaldado	17
2.2.4.3	Escaldado – Secado	17
2.2.5	Fritura por inmersión	17
2.3	Determinación de Propiedades Físicas	19
2.3.1	Humedad	19
2.3.2	Materia Grasa	19
2.3.3	Textura	19
2.4	Modelamiento de Propiedades Físicas	20
2.4.1	Modelamiento de la pérdida de agua durante la fritura	20
2.4.2	Modelamiento de absorción de aceite durante la fritura	22
2.4.3	Modelamiento de los cambios texturales durante la fritura	22
2.4.4	Análisis estadístico	23
2.5	Adquisición de Imágenes	24
2.5.1	Sistema de iluminación y captura	25
2.5.2	Software de Captura	26
2.5.3	Análisis de Imágenes	26
2.6	Análisis Sensorial	27
2.6.1	Etapa de selección y entrenamiento	27
2.6.2	Evaluación sensorial con panel entrenado	28
2.6.3	Grado de calidad de papas fritas	29
2.7	Diseño Experimental	30

2.7.1	Clasificación automática según color .....	30
2.7.2	Validación Cruzada .....	31
<b>3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>32</b>
3.1	Estudio de Parámetros Físicos .....	32
3.1.1	Pérdida de agua durante la fritura .....	32
3.1.2	Absorción de aceite durante la fritura .....	37
3.1.3	Cambios texturales durante la fritura .....	41
3.2	Determinación de calidad mediante visión computacional .....	44
3.2.1	Determinación del grado de calidad.....	44
3.2.2	Clasificación automática según grado de calidad .....	46
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>52</b>
<b>5</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>62</b>
ANEXO 1: Descripción de Métodos.....		62
Determinación de Humedad AOAC (1990) .....		62
Determinación de Materia Grasa: Método de extracción Soxhlet AOAC (1990)....		62
ANEXO 2: Datos Experimentales .....		64
ANEXO 3: Análisis sensorial .....		65
Selección de panel sensorial .....		65
Evaluación sensorial de muestras .....		67
ANEXO 4: Resultados Experimentales .....		68
Estudio de Parámetros Físicos .....		68
Determinación de Calidad mediante Visión Computacional .....		78
ANEXO 5: Rutina Matlab.....		79
Extracción de características .....		79
Clasificación automática según color .....		81

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Grados de calidad según categorías de color.....	29
Tabla 2.2: Categorías de Calidad de tabla de Color a partir de la encuesta de evaluación de color en chips de papas fritas. ....	30
Tabla 3.1: Valores de los parámetros del modelo propuesto para la pérdida de agua durante la fritura de papas <i>French Fries</i> . ....	32
Tabla 3.2: Valores de los parámetros del modelo propuesto para la absorción de aceite durante el proceso de fritura de <i>French Fries</i> .....	37
Tabla 3.3: Valores de los parámetros del modelo propuesto para cambios texturales en la fritura de papas <i>French Fries</i> .....	41
Tabla 3.4: Resumen de resultados para la clasificación automática de <i>French Fries</i> . ....	46
Tabla A.1: Tiempos de fritura, en segundos, para papas control, escaldada, escaldada-secada a 140°C. ....	64
Tabla A.2: Tiempos de fritura, en segundos, para papas control, escaldada, escaldada-secada a 180°C. ....	64
Tabla A.3: Diluciones y claves para el ordenamiento de color.....	65
Tabla A.4: Resultados obtenidos de la etapa de selección del panel sensorial. ....	66
Tabla A.5: Pérdida de agua (base seca) para papas control, escaldado y escaldado-secado a 140°C. Resultados corresponden a promedio y desviación estándar.....	68
Tabla A.6: Pérdida de agua (base seca) para papas control, escaldado y escaldado-secado a 180°C. Resultados corresponden a promedio y desviación estándar.....	68
Tabla A.7: Absorción de aceite (base seca) para papas control, escaldado y escaldado-secado a 140°C. Resultados corresponden a promedio y desviación estándar.....	72



Tabla A.8: Absorción de aceite (base seca) para papas control, escaldado y escaldado-secado a 180°C. Resultados corresponden a promedio y desviación estándar.....	72
Tabla A.9: Fuerza máxima 1 y 2 (N) para papas control, escaldado y escaldado-secado a 140°C. ....	75
Tabla A.10: Fuerza máxima 1 y 2 (N) para papas control, escaldado y escaldado-secado a 180°C. ....	75
Tabla A.11: Resultados obtenidos de la clasificación de imágenes según grado de calidad. Combinaciones entre variables temperatura y tratamientos. ....	78

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama esquemático de la transferencia de masa y calor durante el proceso de fritura (Aguilera, 1997).....	4
Figura 1.2: Diagrama de las tres fracciones de aceite durante el proceso de fritura (Bouchon et al, 2003) .....	7
Figura 1.3: Esquema de un proceso de análisis de imágenes (Mery y Pedreschi, 2005). .....	12
Figura 2.1: Diagrama de bloques del proceso. ....	15
Figura 2.2: Esquema del proceso de fritura (Allen y Rojas, 2009; adaptado para <i>French Fries</i> ).....	18
Figura 2.3: Texturómetro TA-XT2i (Stable Micro Systems, Surrey, UK) .....	20
Figura 2.4: Perfil de textura típico obtenido para papas fritas <i>French Fries</i> (Bunger et al., 2003).....	20
Figura 2.5: Direcciones en las que difunde el agua en un bastón de papa. ....	22
Figura 2.6: Esquema del Sistema de Visión Computacional (León, 2005). ....	24
Figura 2.7: Sistema de Iluminación y Captura (León et al., 2006) .....	25
Figura 2.8: Evaluación sensorial de color para papas <i>French Fries</i> a 3 pretratamientos y dos temperaturas de fritura. ....	28
Figura 2.9: Extracto de tabla de color para papas fritas tipo <i>French Fries</i> [VVAI, 2005].....	29
Figura 2.10: Porcentajes de respuestas obtenidas a partir de la encuesta de evaluación de color en chips de papas fritas (Allen y Rojas, 2009). .....	30
Figura 2.11: Esquema de Validación Cruzada. ....	31
Figura 3.1: Contenido de humedad adimensional (Mt) durante la fritura de <i>French Fries</i> a 180°C. Los símbolos representan los datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.1.....	33

Figura 3.2: Contenido de humedad adimensional (Mt) durante la fritura de <i>French Fries</i> escaldadas. Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.1.....	34
Figura 3.3: Coeficiente de Difusividad Efectiva durante la fritura de papas a 180°C.....	35
Figura 3.4: Coeficiente de Difusividad Efectiva durante la fritura de papas escaldadas.....	36
Figura 3.5: Absorción de aceite durante la fritura de papas escaldadas. Los símbolos representan los datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.3.....	38
Figura 3.6: Absorción de aceite durante la fritura a 180°C de papas <i>French Fries</i> . Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.3....	39
Figura 3.7: Contenido final de aceite (contenido de humedad ~40%) a las dos temperaturas de fritura y para cada pretratamiento.....	39
Figura 3.8: Cinética de cambios texturales durante la fritura de papas <i>French Fries</i> escaldadas representado por la fuerza máxima adimensional (MF*). Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.4....	42
Figura 3.9: Cinética de cambios texturales durante la fritura de <i>French Fries</i> a 180°C representado por la fuerza máxima adimensional (MF*). Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.4.....	42
Figura 3.10: Gráfica comparativa de categorías de calidad para cada pretratamiento a las dos temperaturas de trabajo.....	44
Figura 3.11: Mejor característica encontrada v/s densidad de probabilidad a 140°C.....	47
Figura 3.12: Mejor característica encontrada v/s densidad de probabilidad a 180°C.....	48

Figura 3.13: Relación entre las dos mejores características encontradas a 140°C.....	49
Figura 3.14: Relación entre las dos mejores características encontradas a 180°C.....	49
Figura 3.15: Relación entre las tres mejores características encontradas a 140°C.....	50
Figura 3.16: Relación entre las tres mejores características encontradas a 180°C.....	51
Figura A.1: Sistema Extractor Soxhlet.....	63
Figura A.2: Contenido de humedad adimensional (Mt) durante la fritura de <i>French Fries</i> a 140°C. Los símbolos representan los datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.1.....	69
Figura A.3: Contenido de humedad adimensional (Mt) durante la fritura de <i>French Fries</i> control. Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.1.....	69
Figura A.4: Contenido de humedad adimensional (Mt) durante la fritura de <i>French Fries</i> escaldadas-secadas. Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.1. ....	70
Figura A.5: Coeficiente de Difusividad Efectiva durante la fritura de papas a 140°C.....	70
Figura A.6: Coeficiente de Difusividad Efectiva durante la fritura de papas control.....	71
Figura A.7: Coeficiente de Difusividad Efectiva durante la fritura de papas escaldadas-secadas.....	71
Figura A.8: Absorción de aceite durante la fritura a 140°C de papas <i>French Fries</i> . Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.3....	73

Figura A.9: Absorción de aceite durante la fritura de papas control. Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.3.....	73
Figura A.10: Absorción de aceite durante la fritura de papas escaldadas-secadas. Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.3....	74
Figura A.11: Cinética de cambios texturales durante la fritura de papas <i>French Fries</i> a 140°C representado por la fuerza máxima adimensional (MF*). Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.4....	76
Figura A.12: Cinética de cambios texturales durante la fritura de papas <i>French Fries</i> control representado por la fuerza máxima adimensional (MF*). Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.4....	76
Figura A.13: Cinética de cambios texturales durante la fritura de papas <i>French Fries</i> escaldadas-secadas representado por la fuerza máxima adimensional (MF*). Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.4.....	77
Figura A.14: Cuadro generado por comando 'Bfex' para la extracción de características de papas control <i>French Fries</i> a 180°C. ....	79
Figura A.15: Ejemplo de excel generado de la extracción de características de peras.....	80
Figura A.16: Cuadro generado por comando 'Bfcsel' para la clasificación automática según color. ....	81

## RESUMEN

El objetivo de esta investigación consistió en implementar un sistema para clasificar automáticamente la calidad de papas *French Fries* en cuanto a color, mediante técnicas de visión computacional. Adicionalmente se estudiaron los cambios en las propiedades físicas durante la fritura, tales como humedad, contenido de aceite y textura, para distintos tipos de pretratamiento y temperaturas de fritura.

El procedimiento experimental consistió en la preparación de bastones de papa frita a dos temperaturas de fritura (140 y 180° C) y bajo tres pretratamientos (control, escaldado y escaldado – secado). A través de ensayos preliminares se determinó el tiempo de fritura bajo cada condición para llegar a una humedad final de  $40 \pm 1\%$ , el cual fue dividido en 6 intervalos para realizar una cinética de pérdida de humedad, absorción de aceite y cambios texturales durante la fritura. Los productos finales fueron caracterizados a través de visión computacional mediante la toma de imágenes y su correspondiente procesamiento a través del software Matlab y toolbox Balu, y evaluación de color a través de un panel sensorial entrenado.

Para describir los cambios en las propiedades físicas medidas durante la fritura se utilizaron modelos matemáticos, obteniendo un buen ajuste de datos en cada caso, expresado en el RMS (root mean square), el cual se encontró entre 1,96 y 13,16. Los resultados además expresaron que existe influencia de la temperatura de fritura y de los pretratamientos en las propiedades físicas estudiadas. Independiente del pretratamiento, al aumentar la temperatura, se incrementó la tasa de pérdida de humedad y la difusividad, la absorción de aceite fue menor y en la textura se aceleraron las etapas de ablandamiento y formación de la corteza.

De los pretratamientos aplicados, independiente de la temperatura de fritura, se comprobó que el Escaldado-Secado fue quien más influyó sobre las mediciones, provocando un leve aumento de la difusividad en el tiempo, menor absorción de aceite

y un tejido superficial más firme. El Escaldado, por su parte, al favorecer la salida del agua, aumentó los valores de difusividad y otorgó mayor firmeza al tejido. En la absorción de aceite no presentó diferencias importantes respecto a las papas control.

Con respecto a la clasificación automática de las papas se definieron categorías de calidad según color de cada papa, a través de una encuesta realizada a consumidores de papas tipo chips y a la evaluación entregada por el panel sensorial. Esta categoría de calidad fue asignada a cada imagen y luego mediante un clasificador simple se procedió a realizar la clasificación automática. Los resultados se expresaron en porcentajes de aciertos, el cual indica la predicción correcta de las características sensoriales. La mejor combinación obtenida fue para las temperaturas de trabajo, 140 y 180°C, con un porcentaje de aciertos de un 85% y 87,22%, respectivamente.

## SUMMARY

The objective of this work was to implement a system to classify automatically the quality of *French Fries* according to the color by computer vision techniques. Additionally a study of the changes on physical properties, such as moisture, oil uptake and texture was performed, for several pretreatments and frying temperatures.

The experimental procedure considered the preparation of potato strips at two frying temperatures (140 y 180°C) and three pretreatments (control, blanching and blanching-drying). The total frying time at each temperature-pretreatment condition was determined in order to reach a moisture content of  $40 \pm 1\%$  and was divided into 6 intervals in order to obtain the samples. The moisture, oil uptake and texture were measured in each sample.

A computer vision system was used to capture digital images of potato strips, which were processed by using Matlab software and the toolbox Balu in order to extract characteristics. The color of potato strips was evaluated through a trained sensory panel.

To describe the changes in the measured physical properties during frying mathematic models were used, obtaining a good fit in each case, expressed in RMS (root mean square), which was between 1.96 and 13.16. The results showed the influence of the frying temperature and pretreatments on the physical properties studied. Independently of the pretreatment, at higher frying temperature, the rate water loss and the diffusivity increased, oil uptake decreased and, the texture, showed a faster softening of tissue and hardening of the crust.

For the pretreatment, independent of frying temperature, blanching-drying was the most influential. The results showed that the diffusivity increased lightly, oil uptake decreased and a firmer superficial tissue were obtained. Blanching, on the other hand,



increased the diffusivity, and increased the hardness of the tissue. It did not show significant differences in oil absorption compared to the control potatoes.

For automatic classification of the strips, it was necessary to define the quality categories according to color through a survey applied to frequent consumers of chips and the results of the sensory panel. Each potato chip image was classified into a category. The results were expressed in percentage of correct answers, which indicates the correct prediction of the sensory characteristics. The best combination was for the frying temperatures, 140 and 180°C. The percentages of performances were 85 and 87.22%, respectively.

## 1 INTRODUCCIÓN

Se conocen como *French Fries* a las piezas de papa sometidos a un proceso de fritura por inmersión, principalmente a trozos con forma de bastón obtenidos ya sea de la papa en fresco o bien, procesada, como en el caso de los bastones de papa prefrita congelados (Lara y Liberona, 2008).

Las papas fritas son un snack muy popular y la atracción del consumidor a ellas es en gran parte debido a cambios importantes en su microestructura inducida por la fritura y sus efectos sobre las propiedades físicas y sensoriales (Pedreschi et al., 2004). El color en papas fritas es un importante parámetro a controlar junto con la textura y el contenido de aceite (Troncoso et al., 2009). El color es el resultado de la reacción de Maillard y tiene relación directa con la aceptación o rechazo del producto.

Por lo tanto, la medición de las propiedades fisicoquímicas y sensoriales es de gran utilidad, ya que ayuda a determinar los atributos de calidad en el producto final. Estas mediciones realizadas a través de procedimientos instrumentales y sensoriales son relativamente lentas y generalmente caras. Debido a esto, se están utilizando nuevas herramientas para predecir la calidad de los alimentos. Así surge la visión computacional, la cual se proyecta como un método alternativo al actual, pues es una tecnología en la cual se adquiere y analiza una imagen para obtener información y para el control de procesos.

En algunas fábricas europeas ya se están utilizando algunos sistemas de visión por computador para la evaluación en línea de papas fritas, permitiendo ser ordenados de acuerdo a sus defectos.

## **1.1 Antecedentes Bibliográficos**

### **1.1.1 Materia Prima: La Papa**

La papa, *Solanum tuberosum* L., perteneciente a la familia de las solanáceas, corresponde a una especie dicotiledónea anual; sin embargo, debido a su capacidad de reproducción por tubérculos, puede comportarse potencialmente como una especie perenne. Esta planta está compuesta por una parte que crece sobre el suelo, en la que destacan tallos, hojas, flores y frutos. La otra que crece subterráneamente corresponde a papa-madre (tubérculo-semilla), estolones, tubérculos y raíces (Contreras, 2001).

En términos de su composición, la papa está formada principalmente de agua. La composición química de la parte sólida remanente puede variar ampliamente dependiendo de factores como: variedad, madurez, diferencias ambientales, aplicación de químicos y condiciones ambientales. Adicionalmente, la composición química de la papa se modifica durante el almacenamiento. A temperaturas altas el contenido de azúcar disminuye ( $7 - 10^{\circ} \text{C}$ ) y aumenta la síntesis del almidón, lo contrario ocurre con temperaturas menores a ( $2 - 4^{\circ} \text{C}$ ) ya que el contenido de azúcares reductores aumenta (Anderson, 1994). Es aconsejable entonces, que papas destinadas a fritura sean almacenadas entre  $7,5$  a  $10^{\circ} \text{C}$  (Contreras, 2001). En general, las papas que contienen más de un 2% en peso seco de azúcares son inaceptables para procesar, debido a que este hecho está estrechamente relacionado al color pardo que toma el producto durante las etapas de la producción (Lara y Liberona, 2008).

### **1.1.2 Papas tipo *French Fries***

La papa se consume principalmente como producto natural sin procesos industriales. Sin embargo, en nuestro país su empleo como producto procesado está adquiriendo cada vez más importancia (Trincheró et al., 2007).

En el mundo, las industrias más importantes para papa procesada son aquellas destinadas a la producción de papa frita en hojuelas (chips), papa prefrita congelada o frita en bastones (o a la francesa – *French-Fried*). En Chile, aunque el procesamiento de papa aún no alcanza la importancia que esta industria tiene en países desarrollados, en la última década se ha observado un importante aumento en la producción de papa procesada en distintas formas, principalmente en papa frita en hojuela, pero también en papa frita a la francesa, aunque existe un creciente interés por la producción de papa prefrita congelada (Kalazich, 2009).

Las variedades de papas destinadas al procesamiento industrial difieren sustancialmente de aquellas destinadas al consumo fresco, fundamentalmente en sus características fisicoquímicas y organolépticas (Trincheró et al., 2007).

La producción de papas fritas a la francesa requiere de una variedad de papa que permita cortes de entre 70 y 80 mm de largo aproximadamente, que tenga un bajo contenido de humedad, lo cual imparte al producto una adecuada textura y una baja absorción de aceite durante la fritura. La demanda actual es satisfecha casi completamente por Desirée. Existen muchas más variedades extranjeras especiales para esta industria que eventualmente podrían introducirse al país si el mercado así lo requiere (Kalazich, 2009).

### **1.1.3 Proceso de fritura**

La fritura en aceite es considerada uno de los métodos culinarios más antiguos que se conocen. Reúne varias ventajas frente a otros métodos de cocción como lo son la generación de colores, sabores y texturas únicos.

La fritura por inmersión consiste básicamente en sumergir el alimento en el aceite caliente (Mellema, 2003). Puede ser también definido como un proceso de secado y cocción a través del contacto con el aceite caliente (Pedreschi y Moyano, 2005a). Cuando se inicia el proceso la temperatura de la superficie de los alimentos aumenta rápidamente y el agua superficial comienza a hervir. La temperatura del

aceite baja, pero sólo si la cantidad de alimento supera el valor crítico, será significativamente afectada. Debido a la evaporación del agua, se produce el secado de la superficie del alimento. Además de llevar a la contracción y el desarrollo de la porosidad y rugosidad de la superficie, existe una menor producción de burbujas como consecuencia de la disminución de la humedad superficial, generando progresivamente la formación de una corteza (Mellema, 2003; Rioseco, 1999). Las temperaturas de fritura están en el rango de 120°C a 200°C, pero las temperaturas más comunes se encuentran en el rango de 170°C a 190°C (Bouchon, 2002).

Durante la fritura ocurren dos procesos simultáneos, uno de transferencia de masa y otro de transferencia de calor, en virtud de los cuales se producen cambios microestructurales y fisicoquímicos de los constituyentes del alimento (Figura 1.1). Esto da lugar a propiedades organolépticas beneficiosas y al color de la corteza (Moyano y Pedreschi, 2006).

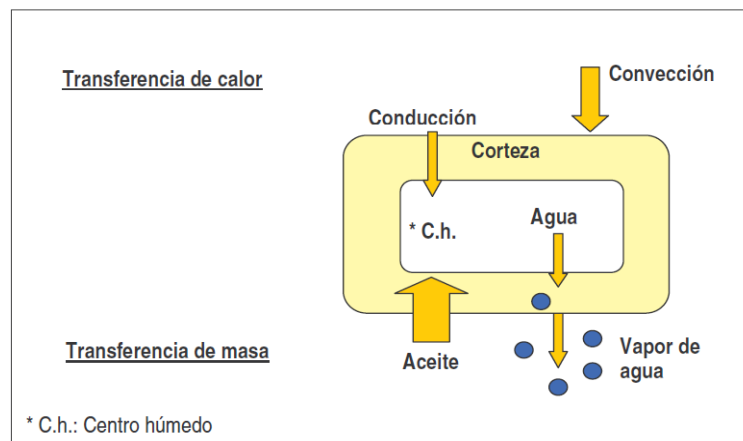


Figura 1.1: Diagrama esquemático de la transferencia de masa y calor durante el proceso de fritura (Aguilera, 1997).

El contenido final de agua de la papa frita va a depender del proceso de transferencia de calor y de masa, explicada como la salida de agua y la absorción de aceite. El aceite y el agua son inmiscibles; para que la fritura ocurra, el calor se debe transferir de un medio no acuoso – aceite, a un medio acuoso – alimento (Muñoz, 2007).

Sobre la base de observaciones visuales, análisis de perfiles de temperatura y datos de humedad, se sugiere que el proceso de fritura está compuesto de cuatro distintas etapas: 1) Calentamiento inicial, dura sólo unos pocos segundos y corresponde al periodo de tiempo en el cual la temperatura superficial alcanza el punto de ebullición del líquido; la transferencia de calor es por convección natural y no ocurre vaporización del agua 2) Evaporación superficial, la cual se caracteriza por una lenta pérdida de agua, el comienzo de la formación de corteza y un régimen de convección forzada debido a altas turbulencias asociadas a los núcleos de ebullición; 3) Fase de pérdida, la cual es la más larga, en la que la humedad interna abandona el alimento, la temperatura del centro húmedo aumenta hasta el punto de ebullición, la capa de corteza aumenta en espesor y finalmente la transferencia de vapor hacia la superficie disminuye; 4) Punto final del burbujeo, en el cual ya no hay burbujeo notorio del medio de fritura pues la mayoría del agua del alimento se ha eliminado, durante esta etapa el alimento incrementa su color tostado (Bouchon, 2002).

#### **1.1.4 Pretratamientos aplicados a los procesos de fritura**

Muchas investigaciones han reportado diferentes tratamientos para mejorar la calidad de los productos fritos en cuanto a su contenido graso, debido a la tendencia cada vez mayor de los consumidores hacia alimentos más sanos y bajos en grasa. Entre los pretratamientos se encuentran:

##### **1.1.4.1 Escaldado**

El blanqueado o escaldado es un tratamiento térmico que se aplica a frutas y hortalizas antes de algún tratamiento como congelamiento, enlatado, deshidratado o freído. Los objetivos del escaldado dependen del tratamiento subsecuente que reciba (Fernández, 2008). En la industria del procesamiento de la papa se utiliza para eliminar el aire de los tejidos, reducir la concentración de azúcares reductores a fin de controlar las reacciones de Maillard y disminuir la formación de acrilamida durante la posterior fritura (Moyano et al., 2002), por lo que el escaldado mejora el color y la textura de las papas fritas.

El escaldado produce cambios estructurales y bioquímicos en el tejido de la papa que afectarán los fenómenos de transporte durante la fritura, por ejemplo: la gelatinización del almidón, ruptura y separación celular (Anderson, 1994), favoreciendo la salida de agua del tejido (Valdez et al., 1999). Durante el escaldado se producen también eventos negativos como lixiviación de ciertas vitaminas y minerales, en el medio de escaldado, que reducen el valor nutritivo del producto final (Fernández, 2008).

Un tratamiento de escaldado óptimo depende del tiempo y la temperatura. La lixiviación de azúcares reductores requiere tiempo y para evitar una sobre cocción de la papa se requiere una temperatura baja de escaldado. Por otro lado, se requieren temperaturas relativamente altas y tiempos cortos de escaldado para la inactivación enzimática. Estos hechos hacen del escaldado una operación unitaria que necesita ser optimizada (Moyano et al., 2007).

#### **1.1.4.2 Escaldado - Secado**

En el proceso de elaboración de *French Fries*, luego de las etapas iniciales de lavado, pelado, selección y corte en bastones, las papas son escaldadas y secadas hasta un contenido de humedad de 60g/100g (base seca), previo a la fritura (Bunger et al., 2003).

Estructuralmente el proceso de secado causa notorias modificaciones en los tejidos de papa. La modificación macroscópica más evidente es la contracción y deformación de las piezas de papa. La pérdida de agua y la separación de los componentes que ocurren durante el secado pueden provocar rigidez, daño y alteración de las paredes celulares, e incluso el colapso del tejido celular. Estos cambios se asocian con la reducción del volumen del producto. Además el secado induce la formación de poros (Troncoso y Pedreschi, 2007).

Por otra parte, el secado, a través de microondas, con aire (convencional) o en horno, conduce a un menor contenido de humedad y se ha demostrado que es una

manera de reducir el contenido de aceite en la fritura posterior debido a la formación de una costra superficial que actúa como barrera a la entrada de aceite (Talburt et al., 1987). Por lo tanto, las etapas seguidas de escaldado y secado permiten una disminución del contenido de aceite en el producto final, además de influir en la tasa de secado durante la fritura (Senadeera et al., 2000).

### 1.1.5 Evolución de parámetros físicos durante la fritura

Durante el proceso de fritura las características físicas, químicas y sensoriales de los alimentos son modificadas. La textura, el color y el contenido de aceite son los principales parámetros de las *French Fries* (Bunger et al., 2003).

#### 1.1.5.1 Contenido de Aceite

Bouchon et al. (2003) identificaron la existencia de tres fracciones de aceite, que dependen del momento en que son absorbidas: el aceite estructural (AE) absorbido durante la fritura; el aceite superficial absorbido (AA) absorbido durante el enfriamiento; y el aceite superficial (AS) que es el que permanece en la superficie (Figura 1.2).

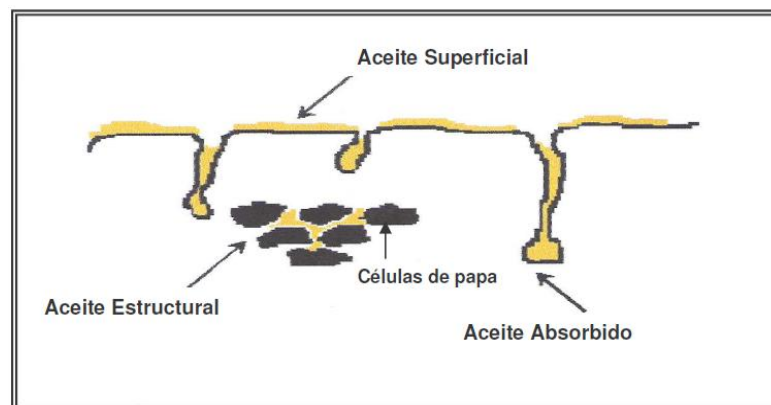


Figura 1.2: Diagrama de las tres fracciones de aceite durante el proceso de fritura (Bouchon et al, 2003)

Es importante destacar que la mayoría del aceite se concentra en la superficie y no penetra durante el proceso de fritura en sí, sino más bien una alta proporción de



aceite superficial penetra al interior de la microestructura durante la remoción, que corresponde al periodo de post-fritura o período de enfriamiento, lo que permite concluir que pese a estar relacionados, la pérdida de agua y la succión de aceite no son procesos sincrónicos (Bouchon et al., 2003; Moyano y Pedreschi, 2006).

Desde el punto de vista nutricional cada vez más se espera productos con menor cantidad de aceite dado los riesgos que significa para la salud el exceso de grasas y por otro lado, los costos de producción aumentan con un gasto mayor de aceite, por lo tanto tecnológicamente se exige una menor absorción de aceite para la economía del proceso de fritura. Es por esto que muchas investigaciones se desarrollan con el objetivo de disminuir la absorción de aceite durante la fritura sumergida. Ellas están focalizadas a la adición de compuestos químicos que pueden disminuir la absorción de aceite, técnicas de cocción y en pretratamientos (Allen y Rojas, 2009).

Sin embargo, los principales parámetros del proceso que influyen en la absorción de aceite son la temperatura y tiempo de fritura. Se ha encontrado que temperaturas entre un rango de 150 y 180°C no tiene un efecto significativo (Varela y Ruiz-Ruso, 1998). Generalmente, a altas temperaturas la absorción de aceite decrece (Pedreschi y Moyano, 2005b; Rioseco, 1999).

#### **1.1.5.2 Textura**

Textura es la propiedad sensorial de los alimentos que se detecta por los sentidos del tacto, la vista y el oído, y que se manifiesta cuando el alimento sufre una deformación (Anzaldúa-Morales, 1994). No se puede hablar de la textura como si fuera una sola característica de un alimento, sino que, más correctamente, hay que referirse a los atributos de textura, o las características o propiedades de textura del alimento, tales como: firmeza, dureza, fragilidad, adhesividad, cohesividad, elasticidad y viscosidad (Sigurgisladottir et al., 1999).

Las papas *French Fries* representan una estructura formada por dos regiones: una región externa deshidratada y crujiente; y una región central húmeda y cocida sin aceite. La corteza externa es muy similar a la estructura de un chip de papa frita (Bouchon, 2002). Una papa tipo *French Fried* de buena calidad debe tener una corteza crujiente de 1-2mm, donde la mayoría del aceite está localizado y un centro húmedo y suave, como papa cocida (Troncoso et al., 2009).

Fundamentalmente, el estudio de las propiedades mecánicas en papas fritas es útil para los cambios de calidad en los parámetros como la crujencia y dureza, las que son de gran importancia para las compañías procesadoras de papas fritas (Lara y Liberona, 2008).

La textura se puede cuantificar objetivamente al graficar la fuerza necesaria para deformar o romper una muestra frente a su deformación. Un ensayo recomendado para estudiar la textura de las *French Fries* es la prueba de punción, que mide la fuerza necesaria para insertar una sonda en un alimento. A pesar de su variabilidad, la prueba de punción entrega una buena discriminación entre las propiedades mecánicas de la corteza y puede ser utilizada para productos de diferentes tamaños y formas, porque es menos sensible a la geometría transversal del producto (Texture Technologies Corp, 1995).

### **1.1.5.3 Color**

El color es el atributo de calidad más relevante en alimentos y debe ser controlado durante la manipulación y el procesamiento. El color de las papas es un criterio extremadamente importante para la industria de procesamiento de la papa y está estrictamente relacionado a la percepción del consumidor, quienes tienden a asociarlo con el sabor, el tiempo de almacenamiento, la nutrición y el nivel de satisfacción (Pedreschi et al., 2007a).

El color de las *French Fries* es el resultado de la reacción de Maillard, que depende del contenido de azúcares reductores y aminoácidos o proteínas en la superficie, y la temperatura y tiempo de fritura (Pedreschi et al., 2004).

El desarrollo del color comienza sólo cuando el alimento se ha secado una cantidad suficiente y también depende de la razón de secado, y el coeficiente de transferencia de calor durante las diferentes etapas de la fritura (Troncoso et al., 2009).

### **1.1.6 Visión Computacional**

La Visión por Computador (VC) es una tecnología para la adquisición y el análisis de una imagen de una escena real por los ordenadores para obtener información o para control de procesos (Brosnan y Sun, 2003). Un sistema de VC en la evaluación de calidad de alimentos tiene como objetivo realizar automáticamente una o más de las siguientes tareas: control de calidad, caracterización, medición y detección de defectos y contaminantes. En particular, la VC se ha utilizado para medir objetivamente el color de papas fritas por medio de valores del nivel de grises. En la Figura 1.3 se presenta un esquema de un sistema de visión por computador, el cual generalmente se compone de las siguientes 5 etapas (Castleman, 1996; Mery et al., 2003; Mery et al., 2010):

#### **1.1.6.1 Adquisición de imagen**

En esta etapa la imagen digital del objeto en estudio es capturada y almacenada en el computador. Cuando se adquieren imágenes, es importante considerar el efecto de la intensidad de la iluminación y la orientación relativa de la muestra a la fuente de iluminación, ya que el nivel de gris de los píxeles está determinado no sólo por las características físicas de la superficie, sino también por esos 2 parámetros. Una cámara digital, tradicionalmente, ofrece tres imágenes digitales: rojo (R), verde (G) y azul (B), correspondiente al espacio de color RGB.

### **1.1.6.2 Pre-procesamiento de imagen**

A través del pre-procesamiento, la calidad de las imágenes digitales es mejorada antes de que sean analizadas. Algunas de las técnicas empleadas en el pre-procesamiento son eliminación de ruidos de la imagen y mejora del contraste a través del filtrado digital. Además, en esta etapa la imagen en color se convierte en una imagen en escala de grises, llamado intensidad de la imagen ( $I$ ).

### **1.1.6.3 Segmentación de imagen**

La intensidad de la imagen se utiliza para identificar regiones disjuntas de la imagen con el fin de separar la parte de interés del fondo. Esta imagen segmentada ( $S$ ) es una imagen binaria compuesta sólo de píxeles blanco y negro, donde "0" (negro) y "1" (blanco) significan fondo y objeto, respectivamente. En este caso, la región de interés dentro de la imagen corresponde a la zona en la que se encuentra la papa frita.

### **1.1.6.4 Extracción de características**

La extracción de características se concentra principalmente en torno a la medición de propiedades geométricas y de la intensidad y características de color de las regiones. Las características geométricas se calculan a partir de la imagen segmentada ( $S$ ) y proporcionan información sobre el tamaño y la forma de una región de un alimento. Las características de tamaño, como área, perímetro, alto y ancho, se dan en píxeles, mientras que las características de forma son, por lo general, coeficientes sin unidades.

Las características de intensidad se extraen de la intensidad de la imagen ( $I$ ) y las características del color de las imágenes RGB. Estas características proporcionan información sobre la intensidad de una región del alimento. Para las imágenes con valores grises (ej: rayos X) hay sólo un canal de intensidad, mientras que para las imágenes a color hay tres canales de intensidad dependiendo del espacio de color utilizado: RGB (Red, Green, Blue),  $L^*a^*b^*$  ( $L^*$  luminosidad,  $a^*$  (verde a rojo),  $b^*$  (azul a amarillo)), y HSV (Hue, Saturation, Value).

### 1.1.6.5 Clasificación

Las características extraídas de cada región son analizadas y asignadas a una clase definida que represente a todos los posibles tipos de las regiones esperadas de la imagen. El clasificador es designado siguiendo un entrenamiento supervisado. Los clasificadores simples pueden ser implementados comparando las características medidas en la segmentación de la imagen. Sin embargo, también es posible utilizar técnicas de clasificación más sofisticadas, como las que llevan a cabo análisis estadísticos y geométricos del espacio vectorial de las características o los que utilizan las redes neuronales o lógica difusa.

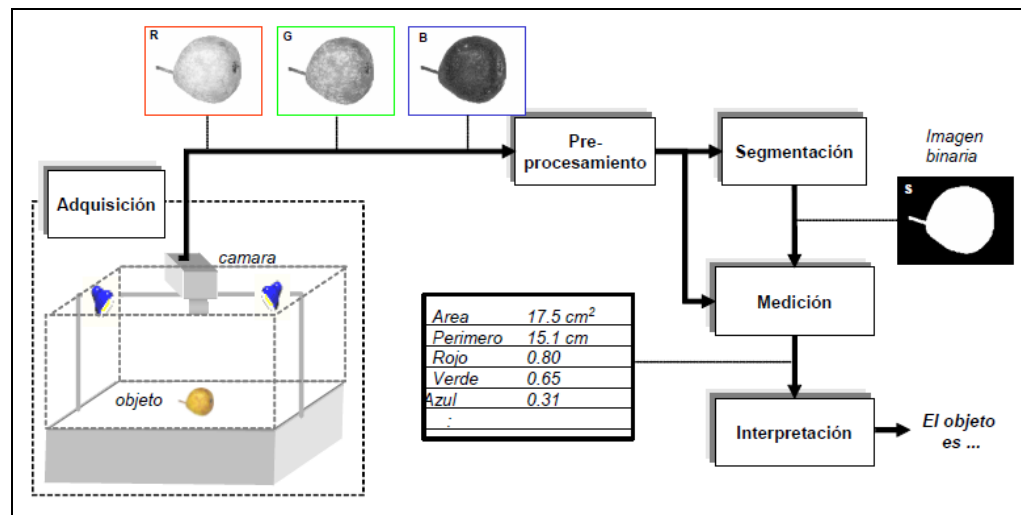


Figura 1.3: Esquema de un proceso de análisis de imágenes (Mery y Pedreschi, 2005).

### 1.1.7 Análisis Sensorial

Es una disciplina científica usada para evocar, medir, analizar e interpretar las reacciones a aquellas características de los alimentos que se perciben por los sentidos de la vista, el oído, el olfato, el gusto y el tacto (León y Galán, 1991). El análisis sensorial es de suma importancia para el control y mejora de la calidad de los alimentos, informando su grado de aceptación o rechazo.

La aceptación de un producto alimentario por parte del consumidor, depende en gran medida de su apariencia o aspecto externo en el que el color ocupa un papel relevante, debido a que suele ser la primera propiedad que el consumidor observa. A través de este atributo valora un alimento antes de su compra y se ha demostrado su importancia en la sensación gustativa y olfativa. Los cambios de color que tienen lugar en los alimentos pueden relacionarse a diversas reacciones de deterioro en alimentos, por lo que además adquiere importancia como índice de madurez y/o deterioro, constituyendo un parámetro de calidad (Fernández, 2008).

## **1.2 Hipótesis de Trabajo**

La visión computacional permitirá clasificar los bastones de papas fritas en categorías de calidad de acuerdo a su color de manera automática, reemplazando el análisis sensorial.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

- Determinar automáticamente la calidad de papas *French Fries* mediante visión computacional para distintos tipos de pretratamiento y temperaturas de fritura, y complementar los resultados con un estudio de sus propiedades físicas, tales como humedad, contenido de aceite y textura.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Estandarizar la preparación de bastones de papa frita a dos temperaturas de fritura (140 y 180° C) y tres pretratamientos (control, escaldado y escaldado-secado).
- Determinar las propiedades físicas (humedad, contenido de aceite y textura) de forma instrumental a las muestras de bastones de papas a los distintos pretratamientos y temperaturas de fritura.
- Obtener la cinética de absorción de aceite, pérdida de agua y textura en los bastones de papas fritas.
- Ajustar modelos matemáticos a las cinéticas obtenidas.
- Obtener imágenes digitales de los bastones de papas para los tres pretratamientos y las dos temperaturas de fritura.
- Evaluar el color de los bastones de papas fritas a través de pruebas sensoriales con un panel de jueces previamente entrenados.
- Determinar, a partir de las pruebas sensoriales, las categorías de calidad de los bastones de papas fritas.
- Con los valores obtenidos de la evaluación sensorial y los correspondientes con el sistema de visión computacional, encontrar un clasificador que permita predecir la categoría de calidad de manera automática.

## 2 METODOLOGÍA

A continuación se presenta el diagrama de bloques del proceso, en el cual se indican las operaciones efectuadas y las condiciones de cada una de ellas.

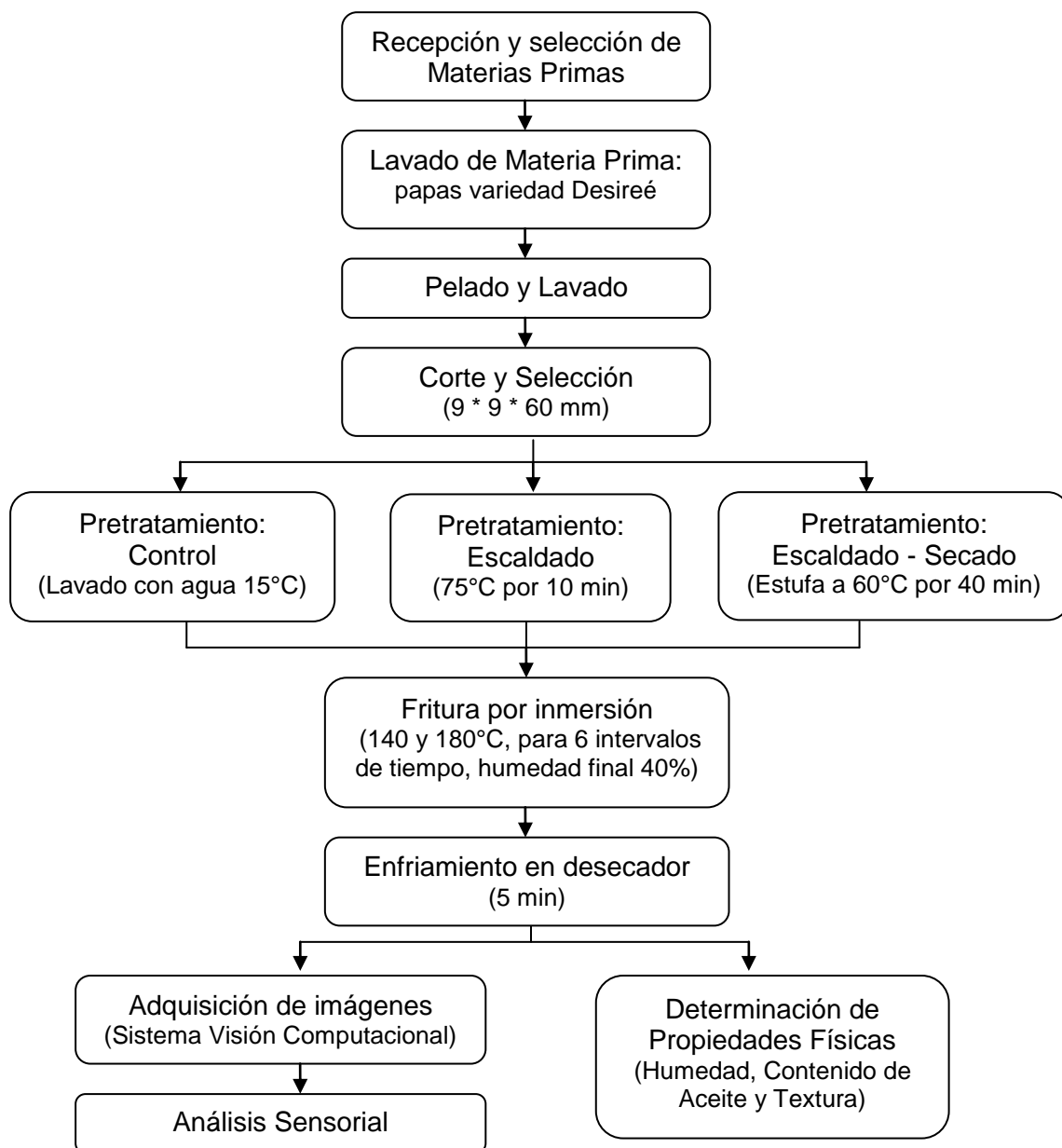


Figura 2.1: Diagrama de bloques del proceso.



## **2.1 Recepción y selección de Materias Primas**

### **2.1.1 Papas**

Para la realización de este estudio se escogieron papas de la variedad Desireé, correspondiente a una variedad de papas ampliamente consumida en el país para la elaboración de papas tipo *French Fries*.

Las papas obtenidas del comercio local se seleccionaron visualmente para evitar la presencia de brotes y pudrición y se almacenaron en una incubadora (VELP Scientifica, FTC 90E) a 8°C hasta su procesamiento (Bunger et al., 2003).

### **2.1.2 Aceite**

El tipo de aceite escogido para llevar a cabo los experimentos se seleccionó en base al tipo de aceite utilizado en investigaciones anteriores, que fue aceite Maravilla marca Chef, compuesto por un 80% de aceite maravilla y 20% de aceite de soya. Este aceite se almacenó a temperatura ambiente.

## **2.2 Elaboración de Muestras**

### **2.2.1 Lavado**

El objetivo de esta etapa fue retirar los restos de tierra adherida de las papas. Para esto se hizo un sólo lavado manualmente por aspersion con agua potable.

### **2.2.2 Pelado y lavado**

Las papas se pelaron manualmente con cuchillo, eliminando su piel y sus defectos propios. Luego se lavaron con agua potable para eliminar residuos.

### **2.2.3 Corte y selección**

Las papas se cortaron con un cortador de verduras y se seleccionaron para obtener bastones de papas homogéneos de dimensiones 9 \* 9 \* 60 mm. Los bastones fueron lavados con agua potable para la remoción del almidón residual de la superficie.

### **2.2.4 Pretratamiento**

En esta investigación se trabajó con 3 tipos de pretratamientos:

#### **2.2.4.1 Control**

Corresponde a bastones de papas crudas, que luego de ser lavados, utilizando papel absorbente, se les retiró el exceso de agua.

#### **2.2.4.2 Escaldado**

Los bastones de papa se sumergieron en agua destilada a 75°C durante 10 min. Para esto se utilizó un vaso de precipitado de 2 L que se dispuso sobre una placa calefactora (IKA RCT Basic), con una relación papa/agua de 60g de bastones en 1,5 L. Luego de transcurrido el tiempo los bastones se dejaron escurrir durante 30 seg. y se retiró el exceso de agua con papel absorbente.

#### **2.2.4.3 Escaldado – Secado**

Los bastones de papas ya sometidos al proceso de escaldado se colocaron en una estufa de convección forzada (WTB Binder, Modelo FD – 115) a 60°C durante 40 min.

### **2.2.5 Fritura por inmersión**

La fritura se llevó a cabo en una freidora eléctrica (Famadich Ltda., modelo Súper Chacón F2-C), la cual fue complementada con un sistema de control de temperatura (Watlow, Serie SD). El proceso de fritura se llevó a cabo a dos temperaturas, 140 y 180°C y para cada pretratamiento.

Durante ensayos preliminares se determinó los tiempos de fritura para los distintos pretratamientos y temperaturas requeridos para alcanzar un 40% de humedad (Anexo 2, Tablas A.1 y A.2). El tiempo de fritura se subdividió en seis intervalos regulares, donde para cada tiempo se frieron 10 bastones, los cuales fueron distribuidos al interior de un sistema de rejillas de dos bandejas, de tal manera de asegurar que se mantuvieran en posición horizontal y sumergidos durante todo el proceso (Figura 2.2).

La freidora se llenó con 5 L de aceite, con lo que la relación papa/aceite fue de  $\sim 0,012$  g/L, de tal forma de que la temperatura del aceite permaneciera constante, con una variación de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  de la temperatura fijada. Una vez terminado el proceso de fritura los bastones se retiraron y se dejaron drenar durante 30 seg., haciendo vibrar manualmente el sistema de rejillas. Finalmente los bastones se colocaron sobre una superficie determinada para que se enfríen durante 5 minutos en un desecador.

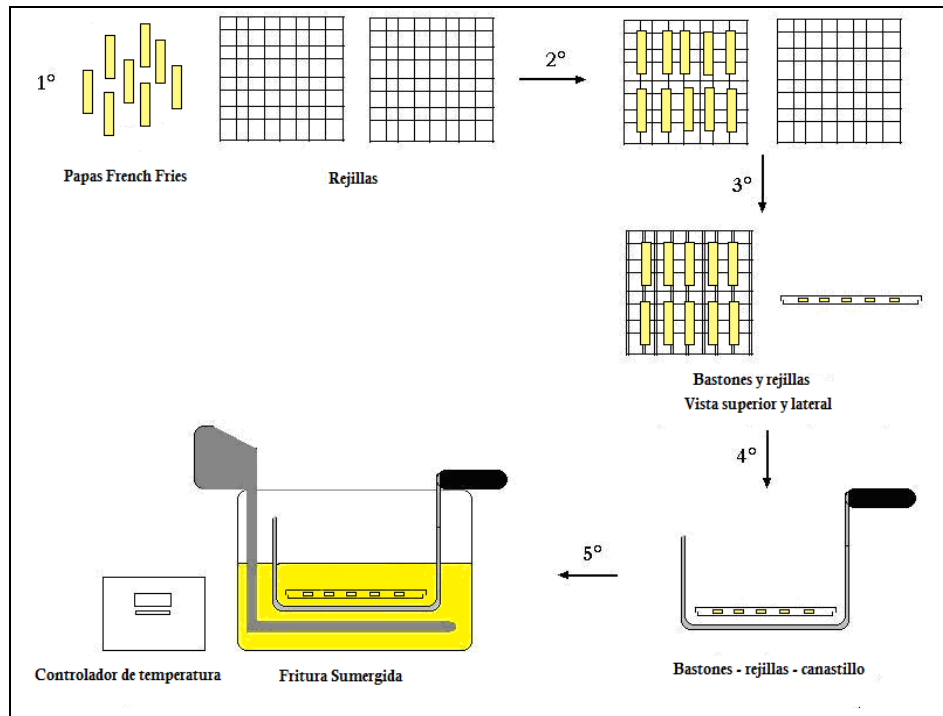


Figura 2.2: Esquema del proceso de fritura (Allen y Rojas, 2009; adaptado para *French Fries*).

## **2.3 Determinación de Propiedades Físicas**

El análisis de propiedades físicas se realizó para los 6 intervalos de tiempo con sus 3 pretratamientos y a las 2 temperaturas.

### **2.3.1 Humedad**

La determinación de humedad se realizó según el método gravimétrico AOAC (1990) en estufa con aire forzado (UNOX XF030 – TG) a una temperatura de 105°C hasta peso constante (Anexo 1, Determinación de Humedad). Este análisis se realizó por triplicado con réplica.

### **2.3.2 Materia Grasa**

La determinación de materia grasa (contenido de aceite) se realizó por el método de extracción Soxhlet AOAC (1990) (Anexo 1, Determinación de Materia Grasa). Este análisis se hizo por triplicado.

### **2.3.3 Textura**

La determinación de textura para las papas *French Fries* se midió en un texturómetro TA-XT2i (Stable Micro Systems, Surrey, UK), conectado al software Texture Expert 5.0.

Se utilizó una sonda especialmente diseñada para papas *French Fries* conocida como Multiple Chip Rig (A/MC), en la cual se mide la resistencia a la penetración de 10 bastones de papas simultáneamente. Cada bastón es penetrado por dos sondas de punción de 2 mm de diámetro a 2 cm de cada extremo (Bunger et al., 2003). Las muestras se penetraron en un 100% a una velocidad de ensayo de 2 mm/s y una distancia de ruptura de 10 mm/s. Los resultados entregados por el software son un promedio de 20 mediciones por tiempo observado. Una gráfica típica se puede observar en la Figura 2.4.



Figura 2.3: Texturómetro TA-XT2i (Stable Micro Systems, Surrey, UK)

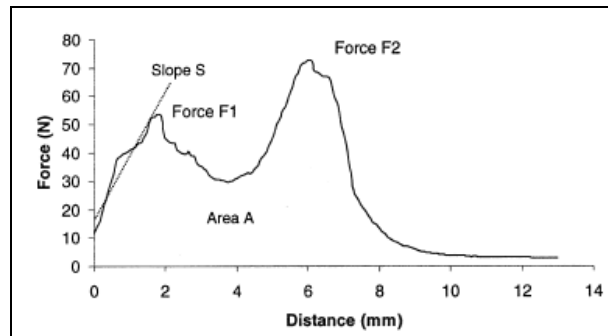


Figura 2.4: Perfil de textura típico obtenido para papas fritas *French Fries* (Bunger et al., 2003).

## 2.4 Modelamiento de Propiedades Físicas

### 2.4.1 Modelamiento de la pérdida de agua durante la fritura

En el proceso de fritura, la pérdida de agua en las primeras etapas ocurre en la superficie, en una combinación de gotitas de agua que dejan la superficie del alimento y evaporación del agua que ebulle. Esta etapa se caracteriza por intensas burbujas cerca de toda la superficie. El mecanismo de la pérdida de agua durante la fritura es complejo. Sin embargo, se han investigado modelos con distinto nivel de complejidad.

Con diferentes alcances, la segunda Ley de difusión de Fick, para estados no estacionarios, ha sido utilizada ampliamente para describir la cinética de pérdida de

agua durante la fritura. El modelo empleado para calcular el coeficiente de difusión durante la fritura, es un modelo empleado para el secado con aire en donde se han propuesto soluciones al modelo de Fick, que permite calcular el coeficiente de difusividad efectiva.

Para describir la pérdida de agua durante la fritura se trabajó con el modelo de Crank (1975) que consiste en una solución de la Ley de Fick. La ecuación es la siguiente:

$$Mt = \frac{m_t - m_e}{m_0 - m_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left( -\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{4(1+b)} \left[ \left( 1 + \frac{D_0 t}{l^2} \right)^{(1+b)} \right] \right) \right\} \quad (2.1)$$

Donde  $M_t$  es el contenido de humedad adimensional (contenido de humedad al tiempo  $t$  / contenido de humedad al tiempo 0),  $m_0$  es el contenido de humedad inicial (base seca),  $m_t$  contenido de humedad (base seca),  $m_e$  contenido de humedad en el equilibrio (base seca),  $l$  es el semiespesor en metros de una de las longitudes de la papa,  $t$  es el tiempo expresado en segundos,  $D_0$  es la difusividad efectiva al tiempo 0 y  $b$  es un parámetro adimensional.

Este modelo considera que las propiedades físicas del material varían con los cambios de temperatura y el contenido de humedad durante la fritura, haciendo que el coeficiente de difusividad efectiva ya no sea un valor constante, sino una función del tiempo, el cual se define como:

$$D_{eff} = D_0 \left( 1 + \frac{D_0 t}{l^2} \right)^b \quad (2.2)$$

Este modelo se utilizó adecuadamente para la geometría de un bastón de papa, asumiendo que la difusión se realizó en dos direcciones, eje Z y eje Y en los bastones de papa. En el eje X la difusión se consideró despreciable, debido a que las

dimensiones laterales (ancho y espesor) son mucho más pequeñas que el largo de la papa, tal como se aprecia en la Figura 2.5.

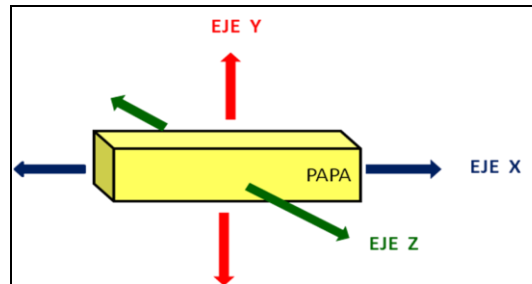


Figura 2.5: Direcciones en las que difunde el agua en un bastón de papa.

#### 2.4.2 Modelamiento de absorción de aceite durante la fritura

Aunque varios estudios han demostrado que la absorción de aceite ocurre principalmente en la etapa de post-fritura, se han utilizado diferentes enfoques para describir la cinética de la absorción de aceite durante la fritura.

Para este estudio se utilizó un modelo empírico, correspondiente a una cinética de primer orden (Moyano y Pedreschi, 2006):

$$O = O_{eq} * (1 - \exp(-K * t)) \quad (2.3)$$

Donde  $O_{eq}$  es el contenido de aceite en el equilibrio y  $K$  es la constante específica para el modelo de primer orden. En el modelo, a  $t = 0$ , el contenido de aceite es nulo y para tiempos mayores, el contenido de aceite alcanza el valor de equilibrio.

#### 2.4.3 Modelamiento de los cambios texturales durante la fritura

De acuerdo al perfil de textura (Figura 2.4), las fuerzas máximas (MF) que se obtuvieron de las curvas son dos. La primera corresponde a la fuerza de compresión (MF 1), que es la fuerza necesaria para romper la costra superior de la papa (fuerza para ingresar a la papa), y la segunda fuerza (MF 2), que es la fuerza necesaria para

romper la costra inferior de la papa (fuerza pasa salir por el otro lado de la papa), ya que la sonda atraviesa toda la papa.

Para el modelamiento de la textura durante la fritura se usó el valor de MF para la fuerza 1 normalizado,  $MF^*$ , que corresponde al valor de MF en cualquier tiempo dividido por el valor de MF al tiempo 0. Se utilizó MF 1 por ser la fuerza en que la sonda penetra en la muestra.

Para describir los cambios texturales durante la fritura se utilizó un modelo propuesto por Pedreschi et al (2001), que describe el desarrollo de la textura durante la fritura. La ecuación del modelo es la siguiente:

$$MF^* = e^{-k_s t} + k_h \cdot t^2 \quad (2.4)$$

Donde  $MF^*$  es la fuerza máxima normalizada,  $k_s$  es la constante cinética para el ablandamiento del tejido de la papa durante la fritura ( $s^{-1}$ ),  $k_h$  es la constante cinética para el proceso de endurecimiento de la corteza ( $s^{-2}$ ) y  $t$  es el tiempo de fritura (s).

El primer término de la ecuación representa el descenso inicial de la  $MF^*$  debido al ablandamiento del tejido de la papa para tiempos cortos, mientras que el segundo término representa el desarrollo de la corteza (endurecimiento). La textura de una papa frita en cualquier momento de la fritura se caracteriza por estos dos términos.

#### **2.4.4 Análisis estadístico**

Los parámetros de cada modelo fueron obtenidos mediante una regresión no lineal utilizando la herramienta SOLVER del programa Microsoft Office Excel, utilizando como función objetivo la minimización de la desviación existente entre los valores observados y los predichos a través del RMS (root mean square), cuya fórmula es la siguiente:



$$\%RMS = 100 \sqrt{\frac{1}{N} \sum \left( \frac{V_{obs} - V_{pred}}{V_{obs}} \right)^2} \quad (2.5)$$

Donde  $V_{obs}$  es el valor observado (experimental),  $V_{pred}$  es el valor predicho por el modelo y  $N$  es el número de datos.

## 2.5 Adquisición de Imágenes

La adquisición de las fotografías de este estudio se realizó mediante un montaje de un sistema de visión computacional, consistente en una caja cúbica de paredes interiores negras, un sistema de iluminación y soporte para la cámara fotográfica digital, la cual fue conectada a un computador para el manejo remoto de la misma, tal como lo muestra el esquema de la Figura 2.6. Para este estudio se fotografiaron de a 10 bastones de papas por sus cuatro caras con el fin de evitar un cambio en el brillo de la imagen debido a la absorción de aceite que ocurre durante el enfriamiento, y así evitar errores en la obtención de los datos. Cada imagen se identificó para que al momento de la evaluación sensorial los jueces vieran exactamente la papa a la cual se tomó la foto.

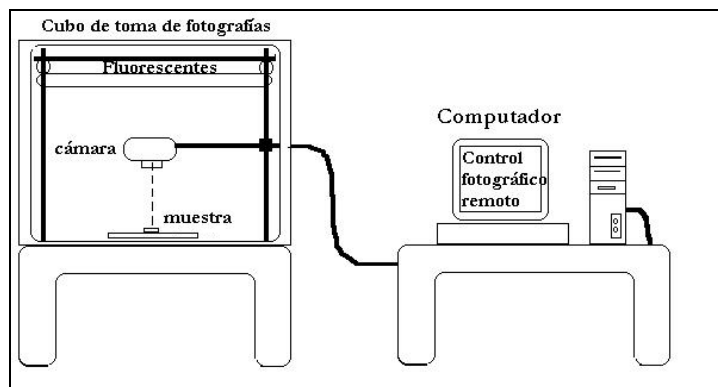


Figura 2.6: Esquema del Sistema de Visión Computacional (León, 2005).

### 2.5.1 Sistema de iluminación y captura

El sistema de iluminación consistió en cuatro tubos fluorescentes Philips, Natural Daylight 18 W (longitud de 60 cm.), con una temperatura de color de 6500°K, correspondiente a la luz día, y un índice de color (Ra) cercano al 95%. Los cuatro tubos se ubican horizontalmente, formando un cuadrado por sobre la cámara para que al iluminar se crease un núcleo de luz homogéneo en el lugar donde se ubicaron las muestras de papa frita (Figura 2.7). El cubo de toma de imágenes tiene sus paredes interiores negras y la superficie donde se ubica la muestra es de goma eva negra, todo esto a fin de evitar alteraciones producidas por brillo sobre la cámara y muestras (León et al., 2006).

Para el sistema de captura la caja posee un soporte para la cámara digital de color Canon Powershot G3 de 4 Mega píxeles, ubicada verticalmente a 22,5 cm. de distancia de las muestras con un ángulo alrededor de 45° entre el eje de la cámara y las fuentes de iluminación. Las imágenes fueron capturadas con la máxima resolución (2272x1704 píxeles) y conectadas al puerto USB de un computador Pentium IV, 1200 MHz (Pedreschi et al., 2006).

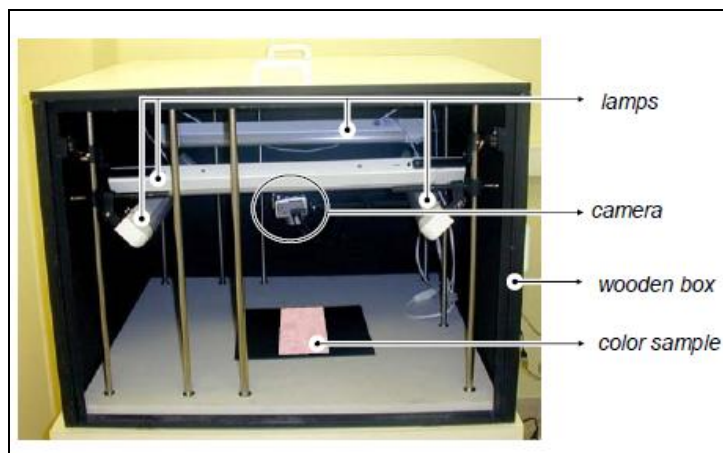


Figura 2.7: Sistema de Iluminación y Captura (León et al., 2006)

El montaje y calibración del sistema de visión computacional fue implementado como parte del proyecto Fondecyt 1070031.

### **2.5.2 Software de Captura**

Para la obtención y posterior análisis de las imágenes digitales se utilizaron dos software: Zoombrowser EX y Matlab.

Zoombrowser EX (versión 4.0.0.105, Canon Inc.), es un programa que permite realizar el manejo remoto de la cámara digital, importando, organizando e imprimiendo imágenes de forma muy sencilla, y que a su vez se complementa con REMOTE CAPTURE (Remote Capture versión 2.6.0.15, Canon Camera Library versión 5.0.0.13), donde se realizan los ajustes de la cámara para la obtención de fotografías (Pedreschi et al., 2006). A continuación se presentan los ajustes realizados:

#### Ajustes de disparo

- Flash: Apagado
- Velocidad ISO: 100
- Modo de medición: Puntual
- Balance de blancos: Fluorescente H
- Efecto de fotografía: Efecto foto
- Modo de disparo: Manual
- Valor de abertura (Av): 8.0
- Velocidad de obturación (Tv):1/15

#### Ajuste de ángulo

- Tamaño /Calidad: RAW
- Distancia focal: 8 mm.
- Macro: Encender

### **2.5.3 Análisis de Imágenes**

Para el análisis de las imágenes se utilizó Matlab, que es una herramienta que por medio del uso de un lenguaje de programación permite analizar datos, visualizar

estos mismos mediante gráficas y realizar cálculos numéricos simples o bien de un grado de mayor complejidad.

Por medio de investigaciones anteriores, efectuadas tanto a chips de papas como a *French Fries*, se han realizado y establecido una serie de comandos (Anexo 5, Rutina Matlab para extracción de características), los que hacen posible que Matlab pueda procesar las imágenes y extraerles una serie de características tanto geométricas como de intensidad.

La toolbox BALU creado por el Sr. Domingo Mery Q., profesor del Departamento de Ingeniería Informática de la Pontificia Universidad Católica de Chile, es capaz de analizar las imágenes de una carpeta en conjunto y entregar las características tanto geométricas como de intensidad en un archivo Excel.

## **2.6 Análisis Sensorial**

En esta investigación el análisis sensorial realizado fue sólo para el atributo color con un panel entrenado de jueces.

### **2.6.1 Etapa de selección y entrenamiento**

Los candidatos elegidos fueron estudiantes de Ingeniería en Alimentos de la Universidad de Chile que cumplían con el requisito de tener aprobado el curso de evaluación sensorial y tuvieran disponibilidad de horario. La selección se inició con 17 personas, considerando que se requería un mínimo de 10 jueces entrenados.

La prueba aplicada fue la de ordenamiento de colores para evaluar su habilidad visual en el reconocimiento y discriminación de colores. En este test se le presentó a cada participante una serie de 10 tubos del mismo color pero en distintas concentraciones y se les pidió que los ordenaran de manera creciente según su intensidad de color, descansando como mínimo 25 minutos entre cada evaluación. Esto se realizó para tres colores: rojo, amarillo y verde. Las tres soluciones madres se

prepararon con colorantes artificiales alimenticios marca Gourmet, de colores: verde (azul brillante, tartrazina y amarillo crepúsculo), rojo (ponceau 4R) y amarillo (tartrazina y amarillo crepúsculo) y luego se prepararon las 10 diluciones distintas (Anexo 3, Tabla A.3).

Las soluciones se presentaron en tubos de ensayo rotulados y llenados con 10 ml aproximadamente. Cada una de las gradillas contenía un set completo de las diluciones y la ubicación de los tubos en las gradillas se realizó al azar. Posterior a esto, los jueces ordenaron los tubos de ensayo del color más débil al más intenso y traspasaron sus respuestas a la ficha de evaluación entregada (Anexo 3, Ficha N°1). Para la aceptación o rechazo de los jueces se calculó el porcentaje de aciertos promedio de los 3 colores. Fueron aceptados y pasaron a la siguiente etapa aquellos participantes que obtuvieron un porcentaje mayor al 60% de aciertos en las tres diluciones (Anexo 3, Tabla A.4) (Pedreschi et al., 2010). Luego de esta selección se familiarizó al panel con las muestras en una sesión de 20 minutos, con el fin de unificar criterios.

### 2.6.2 Evaluación sensorial con panel entrenado

A cada juez se le presentó, por sesión, una bandeja con 3 lotes de 10 bastones de papas fritas cada uno (Figura 2.8), donde cada lote representaba un pretratamiento a una de las temperaturas de estudio realizado por triplicado. La evaluación se hizo sólo con los tiempos finales de fritura. Se realizaron 6 sesiones por cada juez.



Figura 2.8: Evaluación sensorial de color para papas *French Fries* a 3 pretratamientos y dos temperaturas de fritura.

Cada juez comparó cada muestra con una tabla de color (Figura 2.9) diseñada para papas tipo *French Fries*.

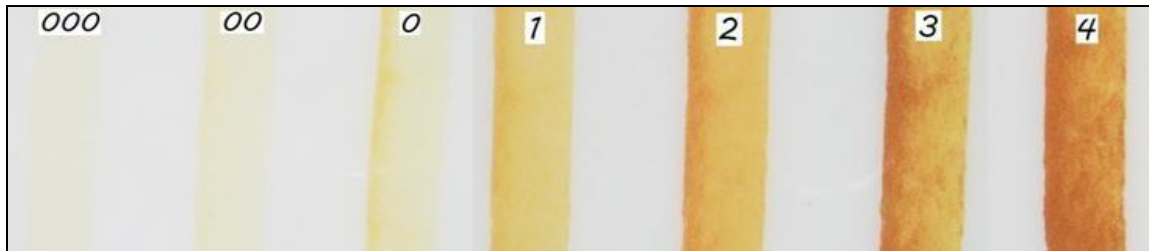


Figura 2.9: Extracto de tabla de color para papas fritas tipo *French Fries* [VVAI, 2005].

A los jueces se les entregó una pauta no parametrizada (Anexo 3, Ficha N°2) en donde a cada muestra se le debía asignar el código que más se asemejara al tono de color de la muestra entregada. Este código aparece en la tabla de color sobre cada papa como se observa en la Figura 2.9.

### 2.6.3 Grado de calidad de papas fritas

Para clasificar las *French Fries* en grados de calidad, previamente se requirió esta clasificación para las papas de la tabla de color (Tabla 2.9), con el fin de traducir posteriormente las respuestas del panel, para lo cual se utilizó la clasificación realizada en la memoria "Determinación de la Calidad y Predicción de Propiedades Físicas en Chips de Papa Frita mediante Visión Computacional" (Allen y Rojas, 2009), en la cual se realizó una encuesta a consumidores de papas fritas comerciales, hombres y mujeres entre 18 y 35 años, en donde clasificaron las papas de la tabla de color (Figura 2.9) en tres grados de calidad (Tabla 2.1), obteniendo lo ilustrado en la Figura 2.10.

Tabla 2.1: Grados de calidad según categorías de color

Categoría	Grado de Calidad
1	Óptimo (Color deseado)
2	Intermedio (Color aun aceptable)
3	Menor (Color no deseado)

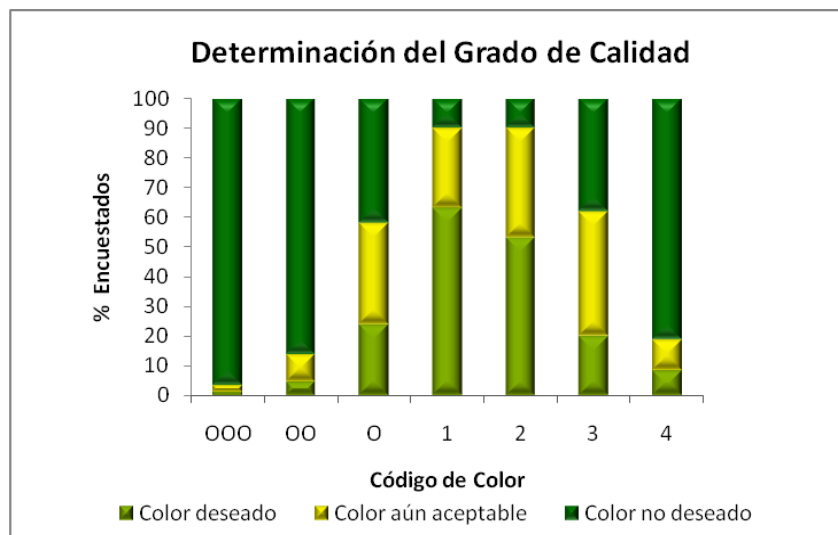


Figura 2.10: Porcentajes de respuestas obtenidas a partir de la encuesta de evaluación de color en chips de papas fritas (Allen y Rojas, 2009).

Con estos resultados definieron las categorías de calidad de las papas fritas de la tabla de color (Figura 2.9), lo cual se presenta en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Categorías de Calidad de tabla de Color a partir de la encuesta de evaluación de color en chips de papas fritas.

Código de Color	000	00	0	1	2	3	4
Categoría de Calidad	3	3	2	1	1	2	3

## 2.7 Diseño Experimental

### 2.7.1 Clasificación automática según color

Para la etapa de validación y clasificación de los resultados se emplearon comandos de la toolbox BALU de Matlab 7.0, que hicieron posible la clasificación automática por color de las imágenes digitales de las *French Fries* (Anexo 5, Rutina Matlab para clasificación automática según color). El programa consiste en el diseño de un clasificador que permita determinar los diferentes grados de calidad de las

imágenes digitales para simular los resultados obtenidos sensorialmente por los jueces.

Para realizar esta clasificación fue necesario entrenar el programa para que lograra diferenciar por color la categoría de calidad de cada bastón. Con el fin de evaluar y validar el desempeño de la clasificación de manera objetiva, la metodología propuesta utiliza la técnica de validación cruzada.

### 2.7.2 Validación Cruzada

En la validación cruzada, los datos se dividen en subconjuntos  $v$ . Una porción  $(v-1)/v$  de todos los datos se utiliza para entrenar y el resto  $(1/v)$  para la prueba. Este experimento se repite  $v$  veces variando el conjunto de entrenamiento y prueba para evaluar la estabilidad del clasificador (Figura 2.11). De esta manera también se logra que los resultados no sean sensibles a los conjuntos definidos, sino que sean absolutos con respecto al total de los datos (Mery et al, 2010).

En cada proceso de entrenamiento se estima el error al conjunto de prueba, para luego determinar el error promedio que se obtiene con la sumas de todos los errores y se divide por la cantidad de procesos.

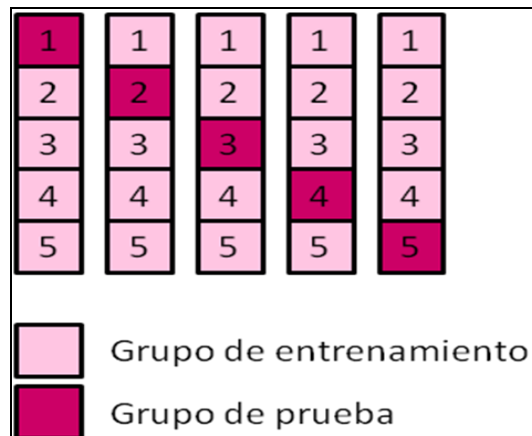


Figura 2.11: Esquema de Validación Cruzada.



### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Estudio de Parámetros Físicos

##### 3.1.1 Pérdida de agua durante la fritura

El modelo propuesto, con coeficiente de difusividad variable (ecuación 2.1), ajusta adecuadamente los datos experimentales de pérdida de agua para todas las condiciones de temperatura y pretratamientos estudiadas, expresado en el RMS, el cual debe encontrarse bajo 10% en promedio para demostrar un ajuste adecuado. Estos valores, junto con el de los parámetros del modelo se presentan en la Tabla 3.1.

Berna (1999) trabajó con el modelo de difusividad variable en *French Fries* impregnadas en sacarosa y cloruro de sodio. En su estudio, en las papas control a 180°C, se encontró un valor de difusividad menor al obtenido ( $1,175 \times 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s). Esto puede explicarse por las mayores dimensiones de la papa en el presente estudio (9x9x6 mm) que en el de Berna (8x8x7 mm), lo que implica una mayor difusividad (Krokida et al., 2000b).

Tabla 3.1: Valores de los parámetros del modelo propuesto para la pérdida de agua durante la fritura de papas *French Fries*.

Tratamiento	Parámetro	Temperatura de fritura (°C)	
		140	180
Control	D <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> /s)	(4,54 ± 0,09) * 10 <sup>-9</sup> <sup>a</sup>	(1,26 ± 0,07) * 10 <sup>-8</sup>
	b (-)	-0,632 ± 0,028	-2,219 ± 0,745
	<b>RMS</b>	<b>6,80</b>	<b>6,83</b>
Escaldado	D <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> /s)	(6,77 ± 0,06) * 10 <sup>-9</sup>	(1,75 ± 0,10) * 10 <sup>-8</sup>
	b (-)	-1,889 ± 0,025	-2,737 ± 0,722
	<b>RMS</b>	<b>3,96</b>	<b>8,25</b>
Escaldado-Secado	D <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> /s)	(3,02 ± 0,01) * 10 <sup>-9</sup>	(5,75 ± 0,01) * 10 <sup>-9</sup>
	b (-)	1,897 ± 0,006	2,528 ± 0,487
	<b>RMS</b>	<b>1,96</b>	<b>2,84</b>

<sup>a</sup> Promedio ± error estándar

La Figura 3.1 presenta los valores de humedad adimensional  $M_t$  en el tiempo para cada pretratamiento a 180°C (la gráfica para la otra temperatura de trabajo se encuentra en el Anexo 4, Figura A.2), donde se puede observar para todos los pretratamientos, que el proceso de fritura muestra una etapa inicial en la que la pérdida de agua es alta, debido principalmente a la pérdida de agua superficial. Durante esta etapa, el vapor de agua es liberado uniformemente a través de toda la superficie como pequeñas burbujas. Luego, al comenzar la etapa de formación de la corteza, la tasa de evaporación decrece hasta que finalmente la evaporación es relativamente constante para los tiempos finales de fritura.

Al comparar los pretratamientos, se puede apreciar que hasta los 4 minutos de fritura (etapa inicial), la tasa de pérdida de agua en las papas escaldadas es mayor que en las papas control, la que a su vez es mayor que en las papas escaldadas-secadas.

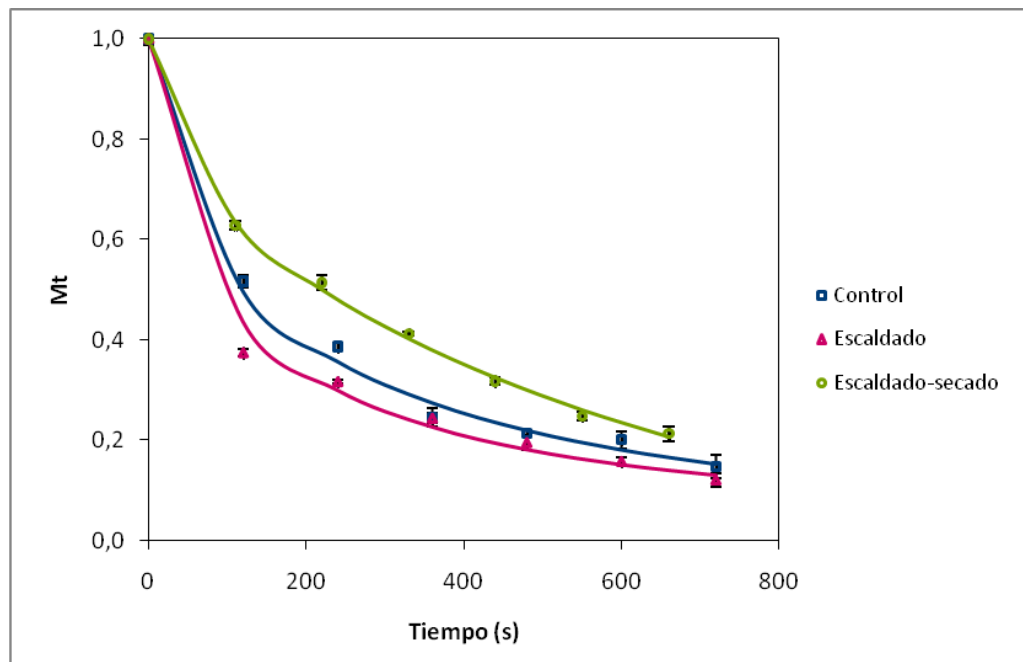


Figura 3.1: Contenido de humedad adimensional ( $M_t$ ) durante la fritura de *French Fries* a 180°C. Los símbolos representan los datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.1.

En este punto es importante mencionar que las papas escaldadas-secadas comienzan el proceso de fritura con una humedad menor (alrededor de un 10% menos) debido al secado previo, lo cual implica que existe menos agua libre disponible para remover durante la fritura (Krokida et al., 2001). De los 4 minutos hasta el final de la fritura, si bien en todos los pretratamientos se alcanza un equilibrio en la evaporación de agua, las papas escaldadas-secadas presentan la tasa de pérdida de humedad mayor.

El efecto de la temperatura en la pérdida de agua se presenta en la Figura 3.2. Como ya se ha reportado en investigaciones previas (Pedreschi et al., 2007b; Moyano et al., 2005) se encontró que la tasa de pérdida de humedad incrementa a una mayor temperatura de fritura, ya que incrementa la tasa de evaporación. Esto ocurre para todos los pretratamientos en estudio (Anexo 4, Figura A.3 y A.4).

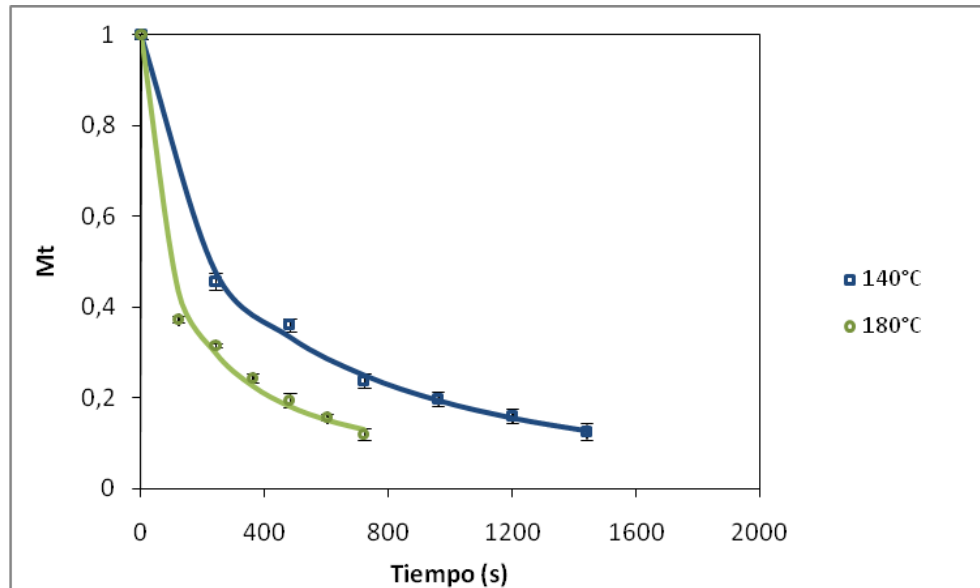


Figura 3.2: Contenido de humedad adimensional ( $M_t$ ) durante la fritura de *French Fries* escaldadas. Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.1.

La variación de la difusividad efectiva en el tiempo para cada pretratamiento a 180°C se presenta en la Figura 3.3. En primer lugar, se observa que existen claras diferencias entre los pretratamientos en estudio. Al tiempo 0, las papas escaldadas presentan la mayor difusividad, lo cual se puede explicar por el hecho de que el escaldado favorece la salida del agua por la gelatinización del almidón (Anderson, 1994). Por esta misma razón, en la Figura 3.1 se observa una tasa de pérdida de agua mayor en las papas escaldadas en un inicio. Por otro lado, las papas pre-secadas son las que presentan la menor difusividad, debido a que el secado previo provoca la contracción del tejido disminuyendo la proporción de poros abiertos, lo cual dificultaría la salida de agua (Krokida et al., 2001).

Luego, en el transcurso del tiempo de fritura, en las papas control y escaldadas, el coeficiente de difusividad efectivo  $D_{eff}$  disminuye con el tiempo, relacionado con la formación de la corteza, que a medida que progresa el proceso de fritura, disminuye su porosidad e impide la rápida salida del agua (Berna, 1999). Pero para las papas escaldadas-secadas se encontró un comportamiento inverso, ya que la difusividad aumenta gradualmente con el tiempo.

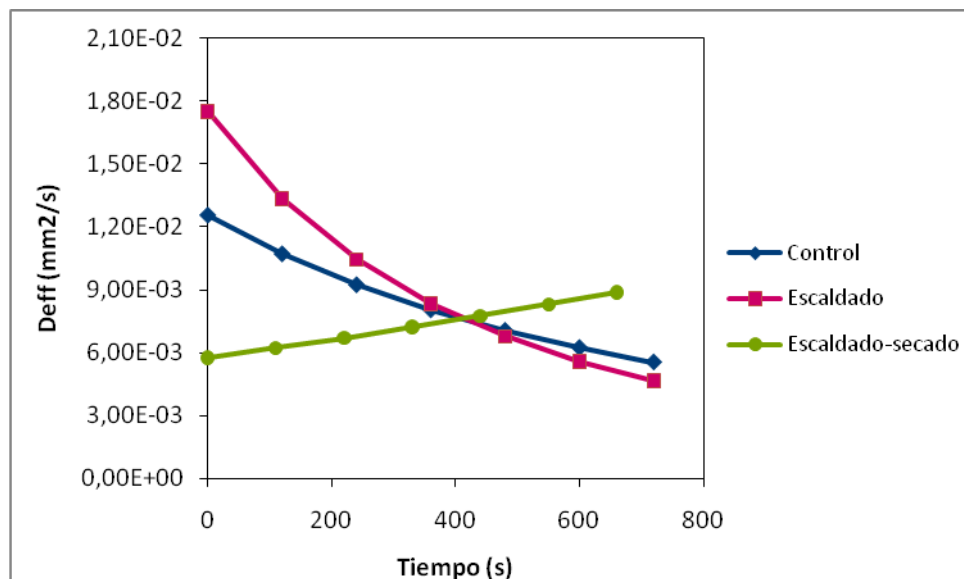


Figura 3.3: Coeficiente de Difusividad Efectiva durante la fritura de papas a 180°C.

Varios estudios han encontrado que el secado previo a la fritura en *French Fries* destruye el tejido mucho más que el escaldado y tiene un efecto significativo en la pérdida de agua y absorción de aceite, tanto como en parámetros estructurales y de color (Lisinska y Golubowska, 2005; Krokida et al., 2001; Tajner-Czopek et al, 2007). Dentro de los cambios estructurales se encontró que el secado previo aumenta la porosidad del tejido durante la fritura hasta alcanzar un equilibrio para los tiempos finales del proceso, y mientras mayor es el tiempo de pre-secado, mayor es la porosidad del tejido (Krokida et al., 2001). Este parámetro es importante en la difusión celular durante la fritura de alimentos (Taiwo y Baik, 2007), por lo que este comportamiento podría sugerir que el aumento gradual de la difusividad durante la fritura de papas pre-secadas se debe a la mayor facilidad del agua para salir del tejido producto del aumento de su porosidad.

En la Figura 3.4 se puede apreciar la influencia de la temperatura en el coeficiente de difusión para el pretratamiento escaldado (papas control y escaldadas-secadas presentan un comportamiento similar al de las papas escaldadas, ver Anexo 4, Figuras A.6 y A.7) encontrando que un incremento de la temperatura de fritura implica un aumento del  $D_{eff}$  (Berna, 1999), lo cual puede relacionarse con la porosidad del tejido que aumenta a mayor temperatura de fritura (Cocio, 2006; Krokida et al., 2000a).

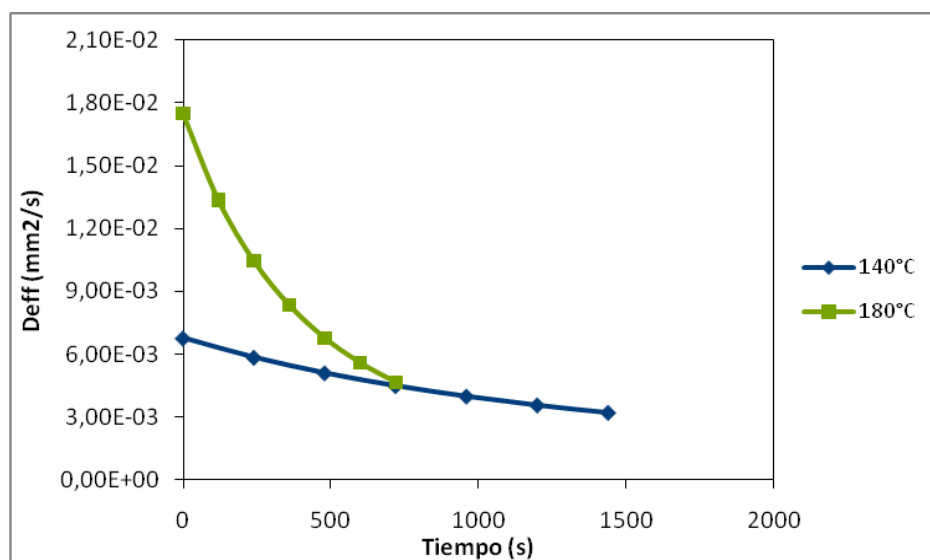


Figura 3.4: Coeficiente de Difusividad Efectiva durante la fritura de papas escaldadas.

### 3.1.2 Absorción de aceite durante la fritura

La Tabla 3.2 presenta los valores de los parámetros del modelo de primer orden propuesto (ecuación 2.3) para cada temperatura de fritura y pretratamiento. Como puede observarse en esta tabla, los valores de RMS (menores a 10%) indican que el modelo se ajustó adecuadamente en cada caso. También se puede observar que la constante específica del modelo,  $K$ , para todos los casos, aumenta con la temperatura de fritura, y que por el contrario, el contenido de aceite en el equilibrio,  $O_{eq}$ , a su vez disminuye. Este resultado concuerda con el hecho de que una mayor temperatura de fritura, conduce a una menor absorción de aceite (Pedreschi y Moyano, 2005b; Rioseco, 1999). Este comportamiento también se puede apreciar en la Figura 3.5, encontrando que la absorción de aceite a 180°C es mucho menor que a 140°C, lo cual se observó también para los otros pretratamientos (Anexo 4, Figuras A.9 y A.10).

Tabla 3.2: Valores de los parámetros del modelo propuesto para la absorción de aceite durante el proceso de fritura de *French Fries*.

Tratamiento	Parámetro	Temperatura de fritura (°C)	
		140	180
Control	$O_{eq}$ (g aceite/ g ss)	0,3107 ± 0,0074 <sup>a</sup>	0,2795 ± 0,0059
	$K$ (s <sup>-1</sup> )	0,0061 ± 0,0008	0,0147 ± 0,0022
	<b>RMS</b>	<b>4,60</b>	<b>4,07</b>
Escaldado	$O_{eq}$ (g aceite/ g ss)	0,3339 ± 0,0076	0,2587 ± 0,0101
	$K$ (s <sup>-1</sup> )	0,0056 ± 0,0007	0,0135 ± 0,0027
	<b>RMS</b>	<b>4,46</b>	<b>4,41</b>
Escaldado-Secado	$O_{eq}$ (g aceite/ g ss)	0,2716 ± 0,0078	0,2421 ± 0,0052
	$K$ (s <sup>-1</sup> )	0,0078 ± 0,0013	0,0136 ± 0,0018
	<b>RMS</b>	<b>5,05</b>	<b>3,98</b>

<sup>a</sup> Promedio ± error estándar

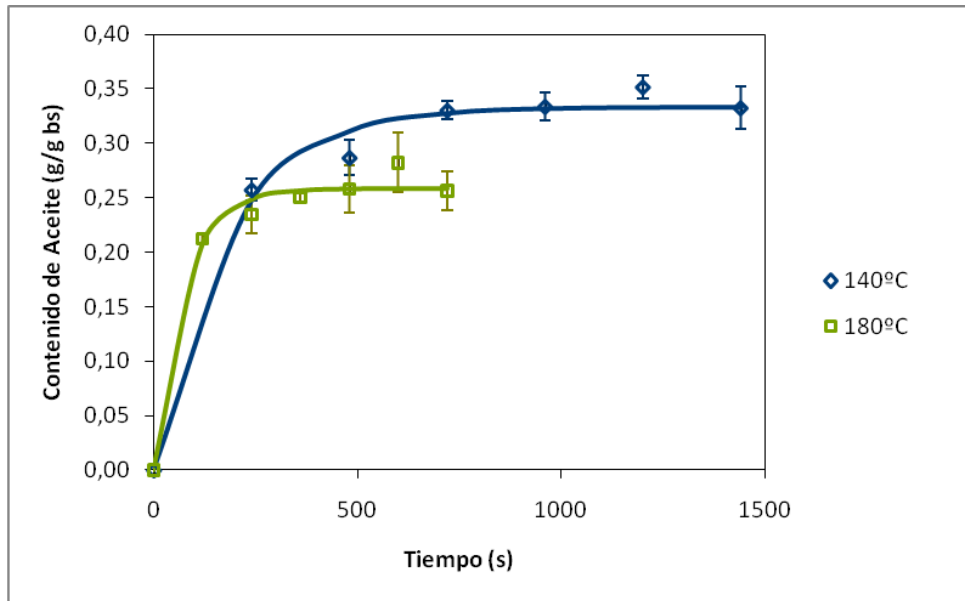


Figura 3.5: Absorción de aceite durante la fritura de papas escaldadas. Los símbolos representan los datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.3.

La Figuras 3.6 y 3.7 muestran el ajuste del contenido de aceite en el tiempo para los bastones de papa en sus tres pretratamientos, control, escaldado y escaldado-secado, a 180°C (resultados similares se encontraron para la fritura a 140°C, ver Anexo 4, Figura A.8); y el contenido de aceite en el equilibrio para cada pretratamiento y temperatura, respectivamente. En la Figura 3.6 se puede apreciar que la absorción de aceite es muy alta a cortos tiempos de fritura, lo que a través de numerosos estudios anteriores, sugiere que la absorción de aceite es un fenómeno superficial, que depende principalmente de la microestructura de la costra que se va formando (Mellema, 2003; Moyano y Pedreschi, 2006; Troncoso y Pedreschi, 2009). Es importante mencionar en este punto que durante el proceso de fritura, la mayor parte del aceite permanece en la región superficial de la pieza de papa, y existe evidencia que es principalmente absorbido cuando las piezas de papa son removidas del medio de fritura, es decir, en el período post-fritura o período de enfriamiento (Bouchon et al., 2003; Troncoso y Pedreschi, 2009). Luego, en el transcurso del proceso de fritura, se puede observar que el contenido de aceite se incrementa hasta alcanzar un equilibrio, el cual representa la máxima cantidad de aceite que la papa frita podría absorber.

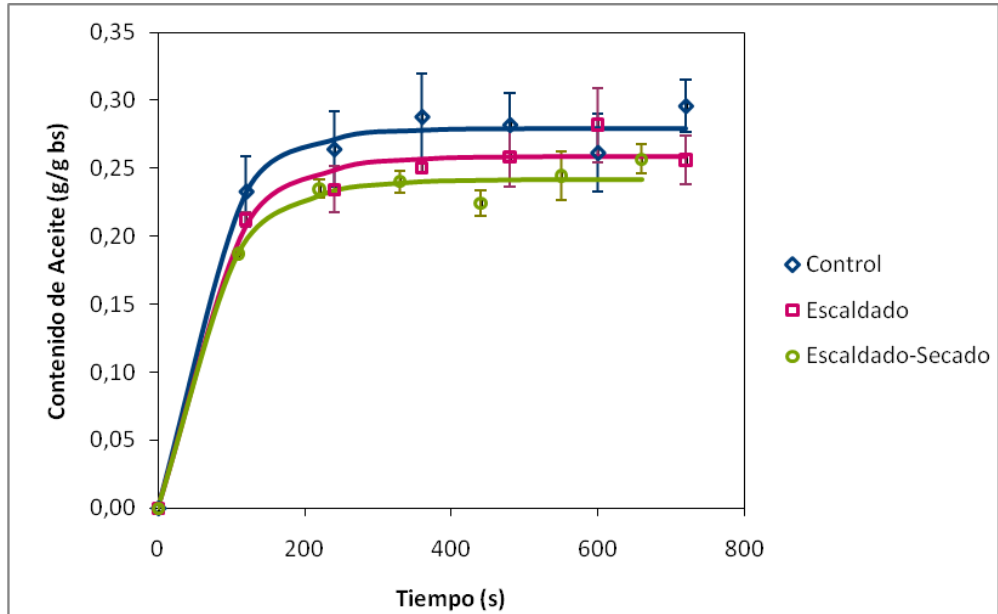
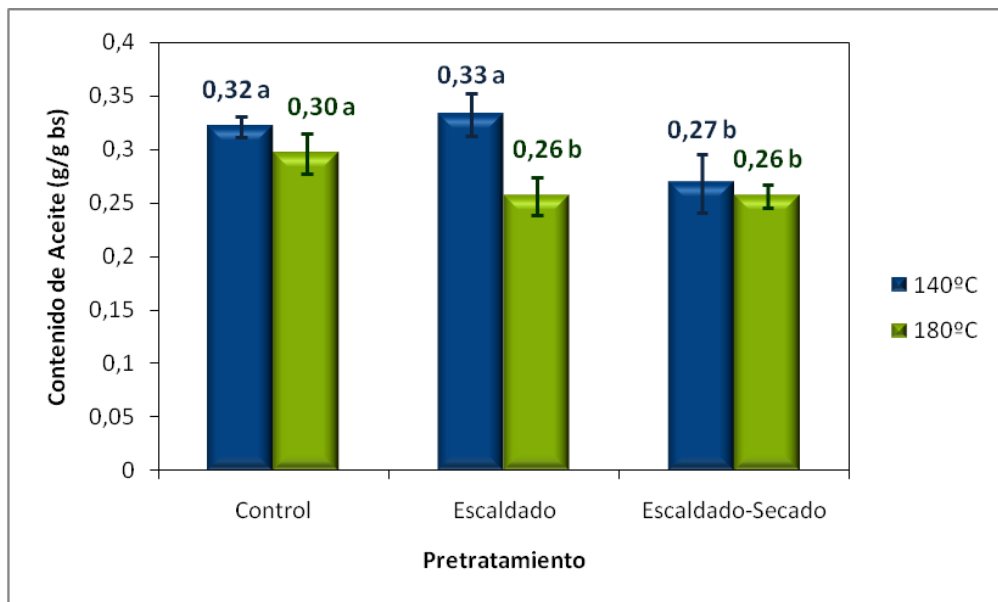


Figura 3.6: Absorción de aceite durante la fritura a 180°C de papas *French Fries*. Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.3.



Superíndices distintos indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre temperaturas de fritura.

Figura 3.7: Contenido final de aceite (contenido de humedad ~40%) a las dos temperaturas de fritura y para cada pretratamiento.



La absorción de aceite presenta un comportamiento diferente para cada uno de los pretratamientos aplicados. Con el escaldado-secado, para ambas temperaturas (Figuras 3.6 y 3.7), las papas absorbieron significativamente menos aceite que las papas control ( $p < 0,05$ ). Este comportamiento era esperado, ya que numerosas investigaciones han mencionado que el secado, como pretratamiento, es una manera efectiva de reducir la absorción de aceite en productos fritos (Moyano et al., 2002; Pedreschi y Moyano, 2005a; Tajner-Czopek et al, 2007, Troncoso y Pedreschi, 2009; Senadeera et al., 2000), debido a que el fenómeno de contracción que ocurre durante el pre-secado, disminuye la proporción de poros abiertos al inicio de la fritura, impidiendo el ingreso de aceite, y en consecuencia, reduciendo su contenido en el producto final (Krokida et al., 2001).

Con respecto al escaldado como pretratamiento, existen investigaciones que lo indican como una etapa que mejora el color y la textura, y podría reducir, en algunos casos, la absorción de aceite por gelatinización del almidón superficial (Califano y Calvelo, 1987). En este estudio se encontró que sólo a la temperatura de fritura de  $180^{\circ}\text{C}$ , las papas escaldadas absorbieron menos aceite respecto a las papas control ( $p < 0,05$ ). Álvarez et al. (2000) encontraron que al escaldar bastones de papas a altas temperaturas y cortos tiempos (ej:  $97^{\circ}\text{C}$ , 2 min), previo a la fritura, se absorbe más aceite que en las papas control. Por otro lado, algunos investigadores han encontrado que al escaldar a bajas temperaturas ( $55-75^{\circ}\text{C}$ ) antes de la fritura, se activa la pectinmetilesterasa (PME) y como resultado de la reacción la textura es más firme, disminuye la porosidad y, por lo tanto, la absorción de aceite (Aguilar et al., 1997; Zhiqiang y Scanlon, 2007).

### 3.1.3 Cambios texturales durante la fritura

El ajuste de los datos al modelo propuesto (ecuación 2.4) presenta valores de RMS sobre 10%, pero no superando un 13%, lo cual se podría considerar un ajuste relativamente bueno. Estos valores, junto con el de los parámetros del modelo, se presentan en la Tabla 3.3.

En esta tabla se puede observar que los valores de  $k_s$  y  $k_h$ , para todos los casos, aumentan con la temperatura de fritura. Como  $k_s$  es la constante cinética para el ablandamiento del tejido de la papa durante la fritura y  $k_h$  es la constante cinética para el proceso de endurecimiento de la corteza, el aumento de ambas con la temperatura indica que un incremento en la temperatura acelera estos procesos (Pedreschi y Moyano, 2005b; Pedreschi et al, 2007b).

En las Figuras 3.8 y 3.9 se pueden apreciar el desarrollo de la textura y el ajuste del modelo, analizando el efecto de la temperatura y de los pretratamientos en estudio, respectivamente.

Tabla 3.3: Valores de los parámetros del modelo propuesto para cambios texturales en la fritura de papas *French Fries*.

Tratamiento	Parámetro	Temperatura de fritura (°C)	
		140	180
Control	$k_s$ (s <sup>-1</sup> )	$(4,00 \pm 0,45) * 10^{-3a}$	$(7,59 \pm 0,53) * 10^{-3}$
	$k_h$ (s <sup>-2</sup> )	$(1,37 \pm 0,18) * 10^{-7}$	$(6,06 \pm 0,49) * 10^{-7}$
	<b>RMS</b>	<b>10,61</b>	<b>12,07</b>
Escaldado	$k_s$ (s <sup>-1</sup> )	$(3,71 \pm 0,44) * 10^{-3}$	$(6,73 \pm 1,20) * 10^{-3}$
	$k_h$ (s <sup>-2</sup> )	$(2,37 \pm 0,75) * 10^{-7}$	$(9,00 \pm 1,23) * 10^{-7}$
	<b>RMS</b>	<b>12,91</b>	<b>13,16</b>
Escaldado-Secado	$k_s$ (s <sup>-1</sup> )	$(2,80 \pm 0,67) * 10^{-3}$	$(5,41 \pm 0,29) * 10^{-3}$
	$k_h$ (s <sup>-2</sup> )	$(2,25 \pm 0,56) * 10^{-7}$	$(7,79 \pm 0,22) * 10^{-7}$
	<b>RMS</b>	<b>12,61</b>	<b>11,43</b>

<sup>a</sup> Promedio  $\pm$  error estándar

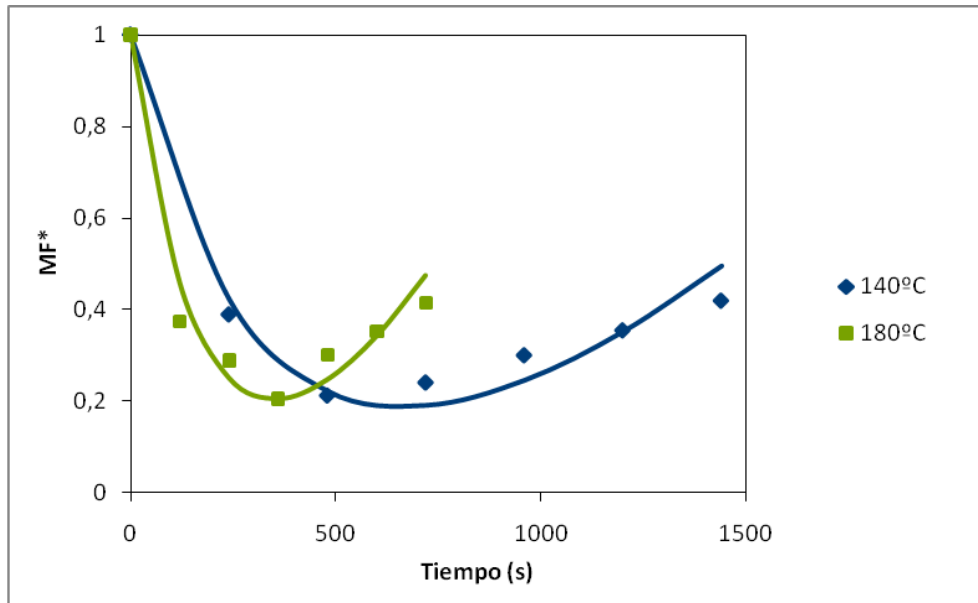


Figura 3.8: Cinética de cambios texturales durante la fritura de papas *French Fries* escaldadas representado por la fuerza máxima adimensional (MF\*). Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.4.

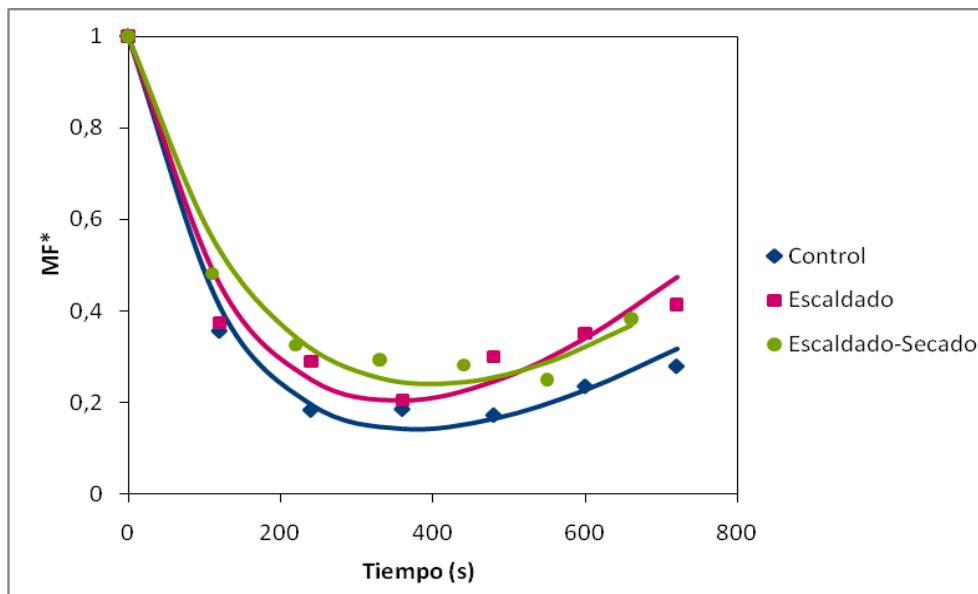


Figura 3.9: Cinética de cambios texturales durante la fritura de *French Fries* a 180°C representado por la fuerza máxima adimensional (MF\*). Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.4.

En ambas figuras se observa que la fritura de bastones de papas muestra una etapa inicial en la que todo el tejido se ablanda ( $t < 6$  minutos), luego el centro comienza a cocerse y comienza la formación de la corteza ( $t > 6$  minutos) y, finalmente la corteza se desarrolla y se endurece progresivamente. Por lo tanto, el parámetro MF\* normalizado, el cual se utilizó para estudiar la cinética de los cambios texturales, permitió no sólo estudiar el ablandamiento de los tejidos, sino también el desarrollo de la corteza (endurecimiento) en los tiempos mayores, por lo que refleja la capacidad de deformación de la costra externa de la pieza de papa por la penetración del elemento de punción (Pedreschi y Moyano, 2005b).

El efecto de la temperatura se hace visible en la Figura 3.8, en la cual se observa que el proceso de los cambios texturales, es decir, tanto ablandamiento de tejido como endurecimiento, ocurre más rápido a una mayor temperatura de fritura (Pedreschi et al., 2001; Pedreschi et al., 2007b), lo cual se observó con anterioridad en las constantes cinéticas del modelo (Tabla 3.3). Este efecto de la temperatura se encontró en todos los pretratamientos (Anexo 4, Figuras A.12 y A.13)

En relación a los pretratamientos aplicados, en la Figura 3.9 se observa hasta aproximadamente los 6 minutos de fritura (etapa de ablandamiento), las papas escaldadas-secadas presentaron mayores valores de fuerza para ser penetradas que las papas escaldadas, finalizando el proceso con valores similares. Por su parte, las papas control presentaron los menores valores durante todo el proceso.

El escaldado, como pretratamiento, es una operación indispensable para el desarrollo de un producto de calidad en términos de textura y color, que cuando se realiza a bajas temperaturas ( $55-75^{\circ}\text{C}$ ) antes de la fritura, por la activación de la pectinmetilesterasa, conduce a una firmeza en la textura proporcionando una manera excelente y segura de preservarla (Fernández, 2008; Zhiqiang y Scanlon, 2007). Por su parte, Agblor y Scanlon (1998) estudiaron el efecto del escaldado en las propiedades mecánicas de las *French Fries* y definieron a la fuerza máxima (N) como la fuerza

requerida para penetrar la papa e interpretaron una mayor fuerza máxima requerida como un incremento en la firmeza de las papas.

Por otro lado, el proceso de secado en papas escaldadas, previo a la fritura, provoca cambios estructurales y físicos en la papa, principalmente su contracción y en su deformación (Troncoso y Pedreschi, 2007), reflejados en el parámetro MF\*. Como la deshidratación durante el pre-secado es principalmente superficial, se genera una corteza, la cual requiere más fuerza para ser penetrada al inicio de la fritura.

### 3.2 Determinación de calidad mediante visión computacional

#### 3.2.1 Determinación del grado de calidad

Para determinar el grado de calidad de las papas en estudio, las respuestas obtenidas por parte del panel sensorial se tradujeron a las categorías de color definidas (Tabla 2.2). De este modo, los resultados obtenidos para cada temperatura de trabajo y pretratamiento se presentan en la Figura 3.10.

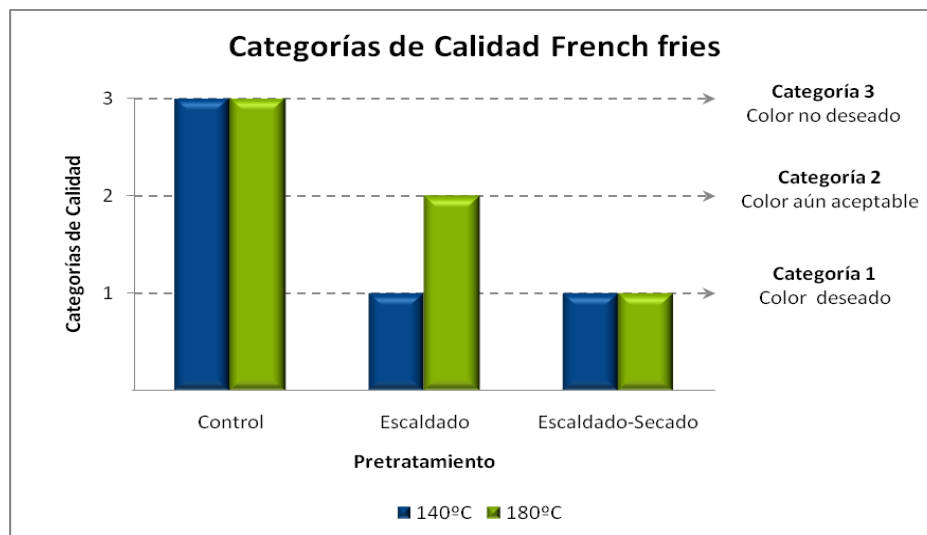


Figura 3.10: Gráfica comparativa de categorías de calidad para cada pretratamiento a las dos temperaturas de trabajo.

Al analizar las categorías de calidad que entregó el panel sensorial se observaron diferencias importantes entre los distintos pretratamientos aplicados. Las papas escaldadas fueron calificadas con la categoría 1 (“color deseado”) para 140°C y 2 (“color aún aceptable”) para 180°C, presentando, en ambos casos, una mejora en el color respecto a las papas control (sin tratamientos previos) que fueron calificadas con la categoría 3 (“color no deseado”), confirmando así que el pretratamiento escaldado, al disminuir la concentración de azúcares reductores, evita la reacción de Maillard, reacción responsable de la generación del color oscuro indeseable en las papas (Pedreschi et al., 2007) .

Con el pretratamiento escaldado-secado se obtuvo la categoría 1 (“color deseado”) en ambas temperaturas de fritura. Estudios anteriores han encontrado efectos negativos del pre-secado en el color de *French Fries* a través de medidas instrumentales (Krokida et al., 2001; Tajner-Czopek et al, 2007). El resultado obtenido, contrario a los estudios, se podría atribuir a que el pre-secado permite que el contenido de humedad inicial disminuya (Krokida et al., 2000a), requiriendo menos tiempo de fritura para alcanzar el 40% de humedad final, y por lo tanto, sometiendo menos tiempo a las papas al proceso de fritura.

Finalmente es preciso mencionar que, tanto para las papas control como para las escaldadas-secadas, no se observaron diferencias en las categorías de calidad entre temperaturas de fritura, contrario al caso de las papas escaldadas. Este hecho se puede atribuir a que al aumentar la temperatura de fritura, también se aceleran las reacciones de deterioro del color (Pedreschi et al., 2007b), lo cual afectó sólo a las papas escaldadas de manera significativa.

### 3.2.2 Clasificación automática según grado de calidad

Cuando se utiliza un sistema de visión computacional en control de calidad, su diseño debe cumplir con las siguientes condiciones: eficiencia y rapidez (Mery, 2002). Por lo tanto, para la presente clasificación, se buscaron las distintas combinaciones de temperatura de trabajo y pretratamiento (Anexo 4, Tabla A.11), con el fin de elegir el clasificador que mejor se comporte como un juez real, cumpliendo con el criterio de obtener el mayor porcentaje de aciertos, y que a la vez sea el que menos características necesite analizar. La idea de este método es seleccionar, del gran universo de características extraídas, sólo aquellas que son relevantes para la separación de clases (Mery et al., 2010).

A partir de estas condiciones, la mejor combinación obtenida para las *French Fries* fue para las temperatura de trabajo, 140 y 180°C por separado, para los tres pretratamientos en conjunto, control, escaldado y escaldado-secado. Los resultados se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Resumen de resultados para la clasificación automática de *French Fries*.

Tratamiento	Temperatura (°C)	Nº de características	% de aciertos	Clasificador
C/E/ES	140	6	85,00 (79,79 – 90,21)	Bknn,4
C/E/ES	180	4	87,22 (83,24 – 91,20)	Bknn,4

C: Control

E: Escaldado

ES: Escaldado-Secado

El porcentaje de aciertos entregado por el programa, por ejemplo para la temperatura de 180°C, indica que con un 95% de probabilidad se obtendrá un porcentaje de aciertos entre 83,24 y 91,20%, con un promedio de 87,22%, lo que implica, por lo tanto, un 12,78% de error. El clasificador seleccionado es el Bknn, 4 (4 vecinos más cercanos), que clasifica según la clase mayoritaria a la que pertenecen sus 4 vecinos más cercanos (Mery et al., 2010).

Las Figuras 3.11 y 3.12 relacionan la mejor característica encontrada en cada caso y la función de densidad de probabilidad. Un 100% de aciertos en la clasificación mostraría que no existe traslape entre las clases. A diferencia de esto, se observa en ambas Figuras, que existe traslape principalmente entre la clase, o categoría de calidad, 1 y 2, y 2 y 3. Esto disminuyó el porcentaje de aciertos e indica que el panel no logró diferenciar entre ambas categorías. Con respecto a las categorías 1 y 3, se puede apreciar que existe un traslape mucho menor en ambas gráficas, indicando que existe una mayor diferenciación, en cuanto a color, de estas clases, es decir, el panel logró distinguir con mayor claridad una papa de color no deseado (clase 3) del color deseado (clase 1).

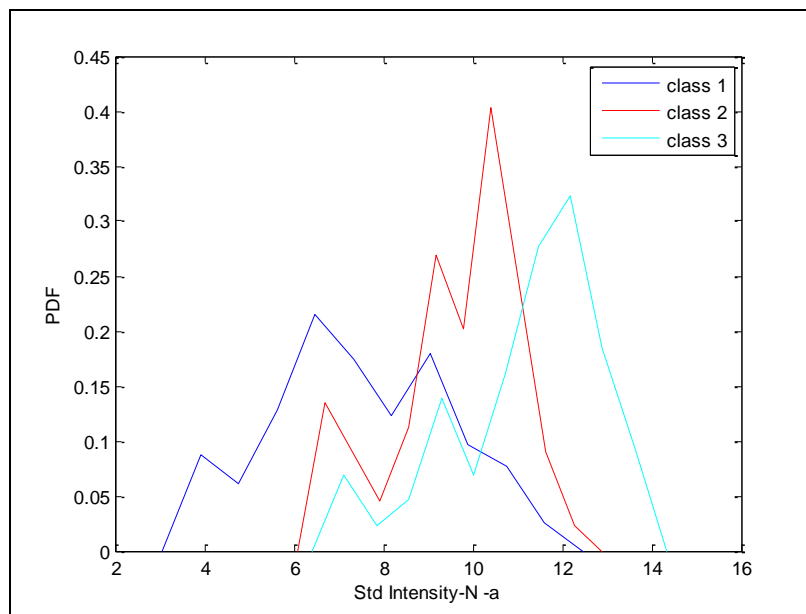


Figura 3.11: Mejor característica encontrada v/s densidad de probabilidad a 140°C.



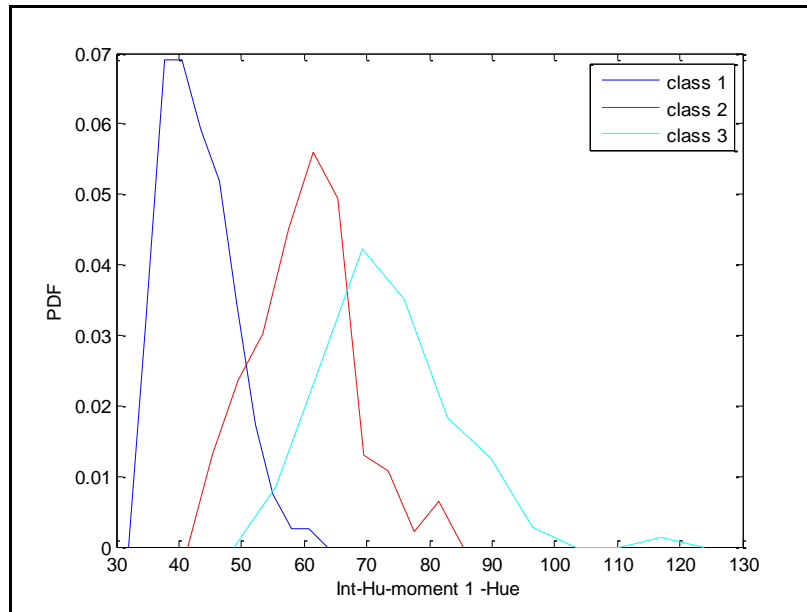


Figura 3.12: Mejor característica encontrada v/s densidad de probabilidad a 180°C.

En cuanto a la mejor característica encontrada para realizar la clasificación, en ambas clasificaciones, a 140 y 180°C, fueron características de intensidad de color de la imagen en el canal de intensidad  $a^*$  (perteneciente al espacio de colores  $L^*a^*b^*$ ) y en el canal de intensidad Hue (perteneciente al espacio de colores HSV), respectivamente. El parámetro  $a^*$  es un componente cromático que va desde rojo a verde (Pedreschi et al., 2004). Por su parte el componente Hue es el tono, también componente cromático, expresado en grado de un ángulo, cuyos valores corresponden a un color (0 es rojo, 60 es amarillo y 120 es verde) (Sural et al., 2002).

Las Figuras 3.13 y 3.14 representan las dos mejores características encontradas en cada clasificación. Para esta gráfica se espera encontrar tres nubes de puntos completamente separadas.

Nuevamente se puede observar que existe un traslape de puntos entre la clase 1 y 2, y 2 y 3, principalmente para la clasificación realizada con los pretratamientos a 140°C (Figura 3.13). En cambio, al observar las clases 1 y 3 se observa que es mucho menor la cantidad de puntos que se mezclan entre sí (puntos azules y celestes), siendo

mayor aún la diferenciación en la Figura 3.14, que muestra la clasificación realizada para los pretratamientos a 180°C. En esta figura se puede observar que sólo existe un punto celeste mezclado con un azul.

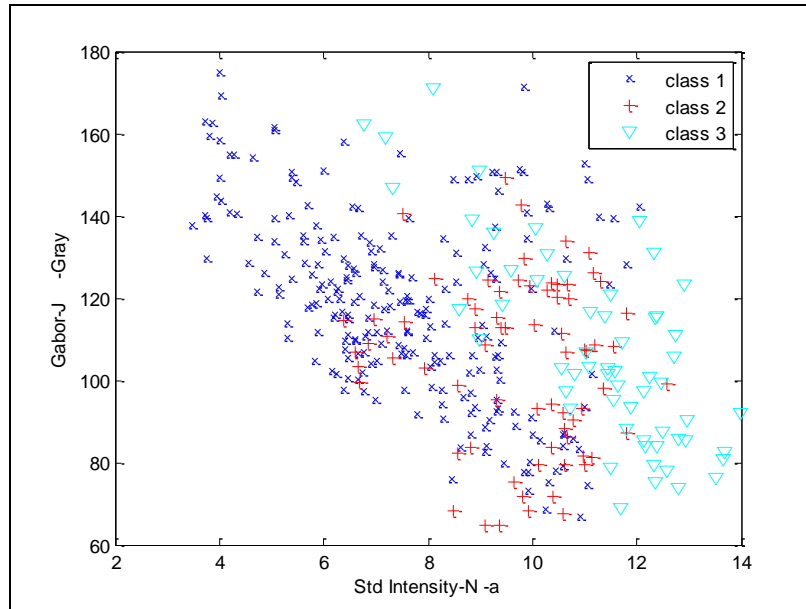


Figura 3.13: Relación entre las dos mejores características encontradas a 140°C.

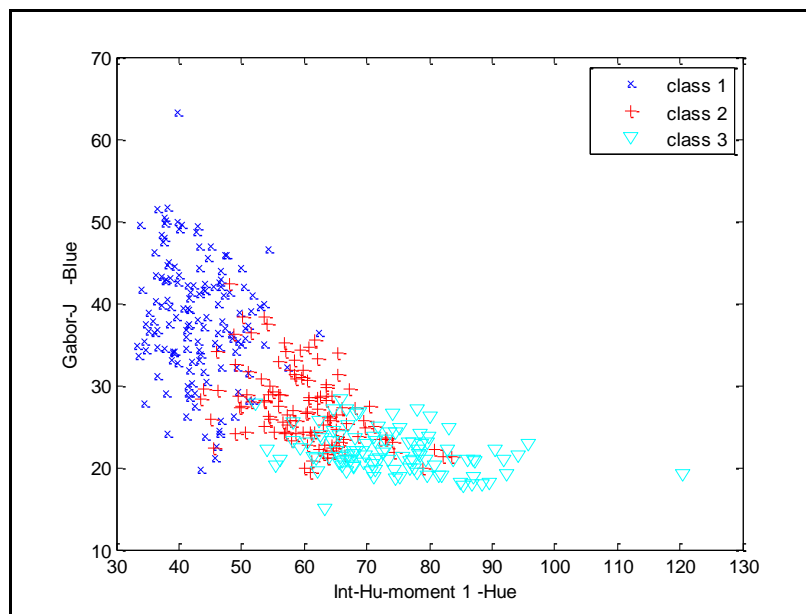


Figura 3.14: Relación entre las dos mejores características encontradas a 180°C.

En cuanto a la segunda mejor característica encontrada, nuevamente, en ambas clasificaciones, corresponden a características de intensidad de color de la imagen, en el canal de intensidad Gray para la clasificación a 140°C y en el canal de intensidad Blue a 180°C. La región Gray corresponde a la escala de grises de la imagen y el componente Blue (perteneciente al espacio de colores RGB) corresponde al color azul (Mery et al., 2010).

Finalmente, las Figuras 3.15 y 3.16 representan un espacio tridimensional de las tres mejores características encontradas para hacer la clasificación de las *French Fries*. En ambas gráficas se observa una mayor diferenciación entre las clases 1 y 3, siendo, a 180°C (Figura 3.16), una separación completa, no existiendo intercepción de puntos, indicando así que el programa logró diferenciar ambas clases.

La tercera mejor característica encontrada, en ambas clasificaciones, corresponde al centro de gravedad, una característica geométrica estándar (Mery et al., 2010).

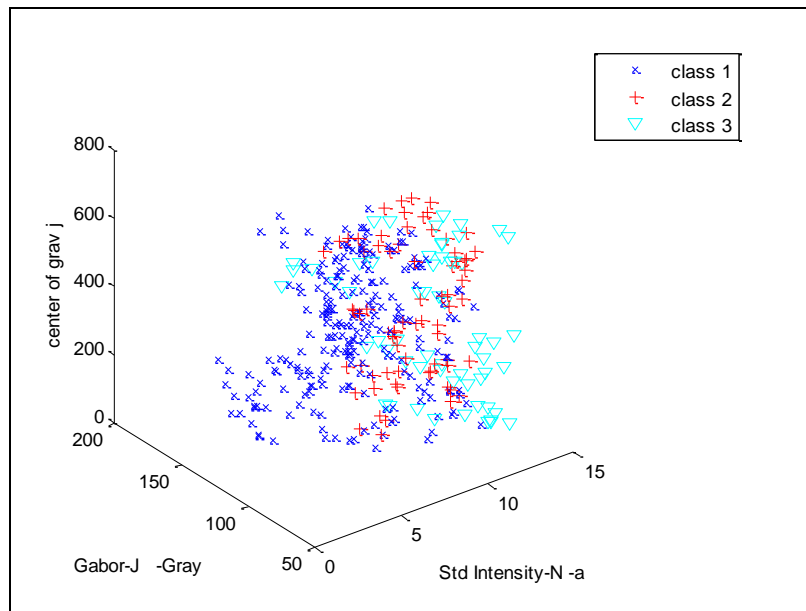


Figura 3.15: Relación entre las tres mejores características encontradas a 140°C.

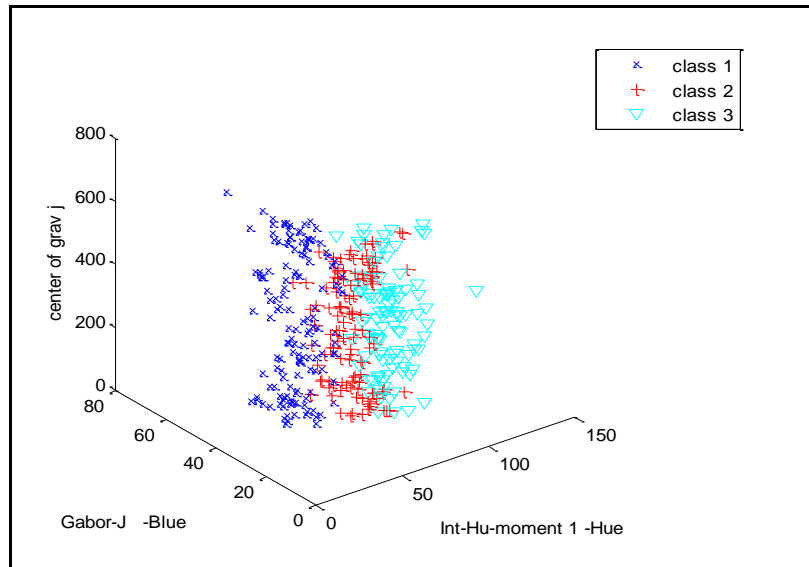


Figura 3.16: Relación entre las tres mejores características encontradas a 180°C.

Finalmente, es importante destacar que con los resultados obtenidos, la visión computacional aplicada a la determinación de calidad a través del color para papas *French Fries* es posible, ya que los resultados obtenidos se consideran buenos (sobre un 85% de aciertos). En la clasificación a 140°C no se logró una diferenciación de clases completa, lo cual se podría atribuir a que, como se presentó en la Figura 3.10, no existieron variaciones sensoriales significativas de color entre los tratamientos escaldado y escaldado-secado, lo cual a través del programa se expresó con la intersección de las nubes de puntos entre clases. La temperatura de fritura tiene efectos significativos en los cambios estructurales y reacciones que ocurren durante este proceso (Krokida et al., 2000a), por lo que estas diferencias también podrían tener relevancia en el color final del producto.

Ahora bien, considerando que en la industria la temperatura comúnmente usada para papas fritas es 180°C (Pedreschi et al., 2004), y el resultado para esta temperatura de trabajo es bastante mejor, se considera que es posible la implementación de este sistema en una línea de procesos para reemplazar al operador humano en cuanto a la clasificación por color.

## 4 CONCLUSIONES

### Estudio de Propiedades Físicas

- Los resultados del estudio de las propiedades físicas medidas, cinéticas de humedad, absorción de aceite y textura, expresaron que existe influencia de la temperatura de fritura y de los pretratamientos en las propiedades físicas estudiadas.
- Al aumentar la temperatura, independiente del pretratamiento, se incrementó la tasa de pérdida de humedad y la difusividad, la absorción de aceite fue menor y en la textura se aceleraron las etapas de ablandamiento y formación de la corteza.
- De los pretratamientos aplicados, independiente de la temperatura de fritura, se comprobó que el Escaldado Secado fue quien más influyó sobre las mediciones, provocando un leve aumento de la difusividad, menor absorción de aceite y un tejido superficial más firme.
- Se lograron modelar adecuadamente las cinéticas obtenidas a través de los modelos propuestos para cada propiedad física, con valores de RMS entre 1,96 y 13,16.

### Determinación de Calidad mediante Visión Computacional

- Mediante la conformación y entrenamiento de un panel sensorial, y basado en una encuesta realizada anteriormente a consumidores de papas tipo chips, se logró definir las categorías de calidad para cada tratamiento y temperatura de trabajo.

- Las papas evaluadas con el grado 1 (color deseado) por el panel fueron las escaldadas-secadas, mientras que las clasificadas con el grado 3 (color no deseado) fueron las papas control. Estos resultados se obtuvieron para las dos temperaturas de trabajo.
- Se logró clasificar automáticamente, de acuerdo al color, cada imagen obtenida digitalmente a través de visión computacional. La mejor combinación obtenida fue para las temperaturas de trabajo, 140 y 180°C y los tres pretratamientos en conjunto, con un porcentaje de aciertos de un 85% y 87,22%, respectivamente, con un 95% de probabilidad.
- Considerando que en la industria la temperatura comúnmente usada para papas fritas es 180°C, es posible la implementación de este sistema en una línea de procesos para reemplazar al operador humano en cuanto a la clasificación por color.

## 5 BIBLIOGRAFÍA

- AGBLOR, A. y Scanlon, M. Effects of blanching conditions on the mechanical properties of *French Fry* strips. Amer J of Potato Res. 75: 245-255, 1998.
- AGUILAR C. N., Anzaldúa-Morales R., Talamás R.y Gastélum G. Low-temperature blanch improves textural quality of *French-Fries*. Journal of Food Science. 62: 568-571, 1997.
- AGUILERA, J.M. Temas en Tecnología de Alimentos. Fritura de Alimentos. CYTED. Instituto Politécnico Nacional. Volumen I, 1997. Pp 187-214.
- ALLEN, P., Rojas, X. Determinación de la calidad y predicción de propiedades físicas en chips de papa frita mediante visión computacional. Memoria para optar al título de Ingeniero en Alimentos. Santiago, Chile. Universidad de Santiago de Chile, Facultad Tecnológica, 2009.
- ÁLVAREZ, M. D., Morillo, M. J. y Canet, W. Characterization of the frying process of fresh and blanched potato strip using response surface methodology. European Food Research and Technology. 211: 326-335, 2000.
- ANDERSON, A. Modelling of potato blanching. Ph. D. Thesis, Lund University. Sweden, 1994.
- ANZALDÚA - MORALES A. La Evaluación Sensorial de los Alimentos en la Teoría y la Práctica. Zaragoza, Editorial Acribia S.A., 1994.
- AOAC, Officials Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemists International. 15<sup>th</sup> Edition, U.S.A., 1990.

- BERNA, A. Estudio del efecto de impregnación con sacarosa y cloruro de sodio en la fritura de papas tipo *French Fries*. Memoria para optar al grado de Magíster en Tecnología de Alimentos. Santiago, Chile. Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, 1999.
- BOUCHON, P. Modeling oil uptake during frying. Thesis submitted as a partial fulfillment for the degree for Doctor of Philosophy. University of Reading, School of Food Biosciences, 2002.
- BOUCHON, P. Aguilera, J.M. y Pyle, D.L. Structure oil-absorption relationships during deep-fat frying. Journal of Food Science. 68: 2711-2716, 2003.
- BROSINAN, T. y Sun, D. Improving quality inspection of food products by computer vision—a review. Journal of Food Engineering. 61:3–16, 2003.
- BUNGER, A., Moyano, P., Rioseco, V. NaCl soaking treatment for improving the quality of *French-Fried* potatoes. Food Research International. 36: 161-166, 2003.
- CALIFANO, A. N. y Calvelo, A. Adjustment of surface concentration of reducing sugars before frying of potato strips. Journal of Food Processing and Preservation. 12: 1–9, 1987.
- CASTLEMAN, K. R. Digital Imaging Processing. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- COCIO, C. Estudio de la distribución del aceite en rodajas de papa frita. Memoria para optar al título de Ingeniero en Alimentos. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas, 2006.



- CONTRERAS, A. La papa. [en línea] Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral de Chile. Curador Germoplasma Chileno de papas, 2001. <[http://www.agrarias.cl/instituto/prod\\_sanidad\\_vegetal/webpapa/pag14.html](http://www.agrarias.cl/instituto/prod_sanidad_vegetal/webpapa/pag14.html)> [consulta: Diciembre 2009]
- CRANK, J. The Mathematics of Diffusion. Oxford, Claredon Press. Segunda edición. 1975.
- FERNÁNDEZ, C. Caracterización reológica y optimización de la textura de purés de patata frescos y congelados. Efectos del proceso y adición de crioprotectores. Memoria para optar al grado de Doctor. Madrid, España. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Veterinaria, 2008.
- KALAZICH, J. Variedades de papa. [en línea] Instituto de Investigaciones Agropecuarias - Centro Regional de Investigación Remehue. Serie Remehue N° 51. [http://www.inia.cl/remehue/publicaciones/online/serie\\_remehue/51/cap5.pdf](http://www.inia.cl/remehue/publicaciones/online/serie_remehue/51/cap5.pdf) [consulta: 07 Diciembre 2009]
- KROKIDA, M.K., Oreopoulou, V. y Maroulis, Z.B. Effect of frying conditions on shrinkage and porosity of fried potatoes. Journal of Food Engineering. 43:147-154, 2000a.
- KROKIDA, M.K., Oreopoulou, V. y Maroulis, Z.B. Water loss and oil uptake as a function of frying time. Journal of Food Engineering. 44:39-46, 2000b.
- KROKIDA, M.K., Oreopoulou, V., Maroulis, Z.B. y Maronos-Kouris, D. Effect of pre-drying on quality of *French Fries*. Journal of Food Engineering. 49:347-354, 2001.
- LARA, Ursula y Liberona, Katia. Influencia de tres métodos de cocción en las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de bastones de papa prefrita

congelados. Memoria para optar al título de Ingeniero en Alimentos. Santiago, Chile. Universidad de Santiago de Chile. Facultad Tecnológica, 2008.

- LEÓN CRESPO, F. y Galán Soldevilla, H. Avances en Análisis Sensorial y paneles de cata. En: Modernas Tecnologías en el procesado de alimentos. Córdoba, Ed. Caja Provincial de Ahorros de Córdoba y ACTA-A, 1991.
- LEÓN, J. Estudio de la cinética de color en rodajas de papa frita empleando visión computacional. Memoria para optar al título de Ingeniero de Alimentos. Santiago, Chile. Universidad de Santiago de Chile, Facultad Tecnológica, 2005.
- LEÓN, L., Mery, D., Pedreschi, F. Color Measurement in L\*a\*b units from RGB digital images. Food Research International. 39: 1084-1091, 2006.
- LISINSKA, G. y Golubowska, G. Structural changes of potato tissue during *French Fries* production. Food Chemistry. 93: 681-687, 2005.
- MELLEMA, M. Mechanism and reduction of fat uptake in deep-fat fried foods. Food Science and Technology. 14: 364-373, 2003.
- MERY, D. Inspección Visual Automática. En: Primer Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica (8-12 de Abril de 2002, Lima). Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Informática. pp s.p.
- MERY, D., da Silva, R., Calôba, L.P., Rebello, J.M.A. Pattern recognition in the automatic inspection of aluminium castings. Insight. 45:475–483, 2003.
- MERY, D. y Pedreschi, F. Segmentation of colour food images using a robust algorithm. Journal of Food Engineering. 66: 353-360, 2005.

- MERY D., Pedreschi, F. Soto, A. Automated Design of a Computer Vision System for Food Quality Evaluation. Pontificia Universidad Católica de Chile. 10 de Enero del 2010.
- MOYANO, P., Rioseco, V. y González, P. Kinetics of crust color change during deep-fat frying of impregnated *French Fries*. Journal of Food Engineering. 54: 249–55, 2002.
- MOYANO, P., Pedreschi, F., Hernández, P., Figueroa, C. Modeling water loss during frying of potato slices. International Journal of Food Properties. 8: 289-299, 2005.
- MOYANO, P. y Pedreschi, F. Kinetics of oil uptake during frying of potato slices: Effect of pre-treatments. LWT. 39: 285-291, 2006.
- MOYANO, P., Troncoso, E. y Pedreschi, F. Modeling Texture Kinetics during Thermal Processing of Potato Products. Journal of Food Science. 72: 102-107, 2007.
- MUÑOZ, J. Reducción del contenido de acrilamida en hojuelas de papas fritas por aplicación de pretratamientos y diferentes temperaturas de fritura. Memoria para optar al grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias Mención Producción Agroindustrial. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, 2007.
- PEDRESCHI, F., Aguilera, J.M. y Pyle, L. Textural Characterization and Kinetics of Potato Strips During Frying. Food Engineering and Physical Properties. 66: 314-318, 2001.

- PEDESCHI, F., Mery, D., Mendoza, F. y Aguilera, J. M. Classification of Potato Chips Using Pattern Recognition. Food Engineering and Physical Properties. 69: 264-269, 2004.
- PEDRESCHI, F y Moyano, P. Effect of pre-drying on texture and oil uptake of potato chips. LWT. 38:599-604, 2005a.
- PEDRESCHI, F. y Moyano, P. Oil Uptake and texture development in fried potato slices”. Journal of Food Engineering. 70: 557-563, 2005b.
- PEDRESCHI, F., León, J., Mery, D., Moyano, P. Development of a computer vision system to measure the 3 color of potato chips. Food Research International. 39: 1092-1098, 2006.
- PEDRESCHI, F., Mery, D., Marique, T. Quality Evaluation and Control of Potato Chips and *French Fries*. En: Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation. Edited by Da-Wen Sun. Canadá. Elsevier Ltd. 2007a. pp. 549-570.
- PEDRESCHI, F., Moyano, P., Santis, N. y Pedreschi, R. Physical properties of pre-treated potato chips. Journal of Food Engineering. 79: 1474-1482, 2007b.
- PEDRESCHI, F., Mery, D., Bungler, A. y Yáñez V. “Computer vision classification of potato chips by color”. DOI: 10.1111/j.1745-4530.2009.00540.x. Journal of Food Process Engineering. 2010.
- RIOSECO, V. Transferencia de materia y parámetros de calidad durante la fritura de papas pretratadas con una solución de NaCl. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico. Santiago, Chile. Universidad de Santiago de Chile, Facultad de Ingeniería, 1999.

- SENADEERA, W., Bhandari, B., Young, G. y Wijesinghe, B. Physical property changes of fruits and vegetables during hot air drying. En: A. S. Mujumdar (Ed.), *Drying technology in agriculture and food sciences*, 2000. pp. 159–161.
- SIGURGISLADOTTIR, S., Hafsteinsson, H. Jonson, A, Lie, O, Nortvedt, R, Thomassen, M y Torrissen, O. Textural properties of raw salmon fillets as related to sampling method. Journal of Food Science. 64: 99-104, 1999.
- SURAL, S., Qian, G. y Pramanik, S. Segmentation and Histogram generation using the HSV color space for image retrieval. En: International Conference on Image Processing (ICIP), 2002: p.589-592. *VIIth Digital Image Computing: Techniques and Applications*, Sun C., Talbot, H., Ourselin.
- TAIWO, K.A. y Baik, O.D. Effects of pre-treatments on the shrinkage and textural properties of fried sweet potatoes. LWT. 40:661-668, 2007.
- TAJNER-CZOPEK, A., Figiel, A. y Rytel, E. Effect of potato strips pre-drying methods on *French Fries* quality. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences. 57:175-181, 2007.
- TALBURT, W. F., Weaver, M. L., Reeve, R. M. y Kueneman, R. W. Frozen *French Fries* and other frozen products. En: W. F. Talburt, & O. Smith (Eds.), *Potato processing*. New York, USA: Van Nostrand Reinhold/AVI, 1987.
- TEXTURE Technologies Corp. TA.XT2 Texture application study: Shoestring *French Fries*. Study number: 29W, 3 p, 1995.
- TRINCHERO, J., Monti, M. y Ceroli, P. Características sensoriales de papas fritas en bastones. Revista Latinoamericana de la Papa. 14: 33-40, 2007.

- TRONCOSO, E., Pedreschi, F., Zúñiga, R.N. Comparative study of physical and sensory properties of pre-treated potato slices during vacuum and atmospheric frying. Food Science and Technology. 42: 187-195, 2009.
- TRONCOSO, E y Pedreschi, F. Modeling of textural changes during drying of potato slices. Food Science and Technology. 82: 577-584, 2007.
- TRONCOSO, E. y Pedreschi, F. Modeling water loss and oil uptake during vacuum frying of pre-treated potato slices. Food Science and Technology. 42: 1164-1173, 2009.
- VALDEZ, A., Welti, J. y Giroux, F. Physico-chemical characteristics of sucrose syrup used for the osmotic dehydration of apples (Golden delicious). Food Science and Technology International. 5: 255-261, 1999.
- VARELA, G. y Ruiz-Ruso, B. Influence of the frying porches on the real fat intake. Grasas y Aceites. 49: 366-369, 1998.
- VERENIGING Voor de Aardappelverwerkende Industrie (VVAI). “Kleurenkaart in Het onker Bewaren”, 2005.
- ZHIAQIANG, E. y Scanlon, M. Modeling the effect of blanching conditions on the texture of potato strips. Journal of Food Engineering. 81:292-297, 2007.

## **ANEXOS**

### **ANEXO 1: Descripción de Métodos**

A continuación se describe la metodología para la determinación de humedad y absorción de aceite.

#### **Determinación de Humedad AOAC (1990)**

Fundamento: El método utilizado se basa en la determinación gravimétrica de la pérdida de masa de la muestra desecada hasta masa constante en estufa de aire.

Procedimiento: Se colocaron aproximadamente 3 g de muestra en una cápsula de aluminio, cuidadosamente picados y pesados en balanza analítica (GR-200), para luego ser ubicadas en la estufa a 105°C hasta peso constante. Posteriormente se dejó en desecador 30 minutos, para finalmente pesar nuevamente la cápsula con la muestra desecada.

#### **Determinación de Materia Grasa: Método de extracción Soxhlet AOAC (1990)**

Fundamento: Este método consiste en una extracción de grasa del producto que se realiza en caliente por medio de un solvente, que para este caso es éter de petróleo (Mallinckvoldt Chemicals, P.E. 35° - 60°C), el cual se encarga de lavar continuamente la muestra a medida que se evapora, se condensa y recircula, arrastrando de esta manera la grasa contenida en el alimento.

Procedimiento: Para la realización de este análisis se utilizaron aprox. 4 g de muestra secada previamente en estufa de secado (WTB Binder, modelo FD – 115) a 60°C por 12 horas, y molida y homogenizada en mortero.

El Sistema Extractor Soxhlet consistió en 6 mantos calefactores (Fisatom, modelo 52) y sus respectivos balones, cámaras extractoras y refrigerantes. Se pesaron los balones en una balanza analítica (GR-200) y luego se pesó un dedal, donde se dispuso la muestra secada, la cual fue tapada con un trozo de algodón. Este dedal se introdujo en la cámara de extracción. Posteriormente se colocó 150 [mL] de Éter de Petróleo en cada cámara de extracción cuidando que el dedal quedara completamente sumergido en el solvente. Ya instalado el Sistema Extractor Soxhlet se hizo correr el agua de la red hacia la cámara refrigerante donde finalmente se encendieron los mantos calefactores a 70°C aproximadamente durante 4 horas

Luego de finalizado el proceso de extracción, los balones con aceite y solvente se llevaron al evaporador rotatorio (marca Fisatom, modelo 803/804) con un baño de agua a 70°C. Para eliminar remanentes de solvente, los balones se llevaron posteriormente a la estufa de secado a 60°C durante 30 minutos. Este análisis se hizo por triplicado.



Figura A.1: Sistema Extractor Soxhlet



## ANEXO 2: Datos Experimentales

Tabla A.1: Tiempos de fritura, en segundos, para papas control, escaldada, escaldada-secada a 140°C.

Intervalo	Tiempo (s)		
	Control	Escaldado	Escaldad-secado
0	0	0	0
1	250	240	190
2	500	480	380
3	750	720	570
4	1000	960	760
5	1250	1200	950
6	1500	1440	1140

Tabla A.2: Tiempos de fritura, en segundos, para papas control, escaldada, escaldada-secada a 180°C.

Intervalo	Tiempo (s)		
	Control	Escaldado	Escaldad-secado
0	0	0	0
1	120	120	110
2	240	240	220
3	360	360	330
4	480	480	440
5	600	600	550
6	720	720	660

### ANEXO 3: Análisis sensorial

#### Selección de panel sensorial

Tabla A.3: Diluciones y claves para el ordenamiento de color.

<b>Clave dilución Rojo</b>	<b>Clave dilución Amarillo</b>	<b>Clave dilución Verde</b>	<b>Jugo solución madre (ml)</b>	<b>Agua (ml)</b>
M	L	A	45	55
R	F	P	50	50
S	P	M	55	45
P	A	K	60	40
K	S	F	65	35
W	M	Z	70	30
L	R	W	75	25
A	W	S	80	20
F	K	L	90	10
Z	Z	R	100	-

Tabla A.4: Resultados obtenidos de la etapa de selección del panel sensorial.

	<b>Verde</b>	<b>Rojo</b>	<b>Amarillo</b>	
<b>Juez</b>	<b>% Aciertos</b>	<b>% Aciertos</b>	<b>% Aciertos</b>	<b>PROMEDIO</b>
Cristian Arellano	80	60	80	<b>73,3</b>
Constanza Barahona	100	50	80	<b>76,7</b>
Denisse Jeria	80	20	50	<b>50,0</b>
Natalia Reyes	100	60	100	<b>86,7</b>
Alejandra Lozano	40	70	100	<b>70,0</b>
Sergio Lobos	100	100	80	<b>93,3</b>
Pamela Soto	40	40	100	<b>60,0</b>
Macarena Tapia	40	40	50	<b>43,3</b>
Pilar Morgan	100	70	80	<b>83,3</b>
Rocio Rivas	80	70	40	<b>63,3</b>
Laura Hurtado	100	80	100	<b>93,3</b>
Pamela Gonzalez	60	30	60	<b>50,0</b>
Alberto Pozo	80	80	80	<b>80,0</b>
Elizabeth Muñoz	60	20	100	<b>60,0</b>
Paulina Vergara	100	50	60	<b>70,0</b>
Alejandro Sanhueza	80	100	20	<b>66,7</b>
Tomás Cáceres	100	80	60	<b>80,0</b>
<b>PROMEDIO</b>	<b>78,82</b>	<b>60,00</b>	<b>72,94</b>	<b>70,59</b>

## Evaluación sensorial de muestras

### FICHA DE RESPUESTA N°1

RANKING DE COLOR	
Set: <u>(Verde, Amarillo o Rojo)</u>	Nombre: _____
Test: <u>Ordenamiento</u>	Fecha: _____
<p>Por favor ordene los tubos que contienen las soluciones coloreadas de acuerdo al aumento de intensidad de color.</p> <p>Anote en la línea inferior la letra de cada tubo en el orden que haya establecido.</p>	
(más débil)	(más intenso)

### FICHA DE RESPUESTA N°2

Test de reconocimiento de color en papas fritas French fries										
NOMBRE:	_____	Fecha:	_____	Set:	_____					
A continuación se le presentarán una bandeja con 10 muestras de papas fritas junto con una tabla de color. De este modo, a cada muestra coloque el código de la tabla de color que más se le asemeje.										
<b>Muestra</b>										
<b>COD</b>										
<b>Muestra</b>										
<b>COD</b>										
<b>Muestra</b>										
<b>COD</b>										
Muchas Gracias.										

## ANEXO 4: Resultados Experimentales

### Estudio de Parámetros Físicos

Tabla A.5: Pérdida de agua (base seca) para papas control, escaldado y escaldado-secado a 140°C. Resultados corresponden a promedio y desviación estándar.

Intervalo	Humedad (g agua/g sólido seco)					
	Control		Escaldado		Escaldado-Secado	
	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$
0	4,716	0,008	5,634	0,008	3,218	0,010
1	2,482	0,006	2,576	0,015	2,118	0,016
2	1,769	0,017	2,036	0,012	1,678	0,009
3	1,496	0,005	1,347	0,013	1,396	0,004
4	1,251	0,006	1,114	0,013	1,179	0,014
5	0,783	0,004	0,901	0,013	0,922	0,006
6	0,707	0,015	0,708	0,016	0,812	0,004

Tabla A.6: Pérdida de agua (base seca) para papas control, escaldado y escaldado-secado a 180°C. Resultados corresponden a promedio y desviación estándar.

Intervalo	Humedad (g agua/g sólido seco)					
	Control		Escaldado		Escaldado-Secado	
	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$
0	4,716	0,008	5,634	0,008	3,218	0,010
1	2,436	0,011	2,109	0,006	2,020	0,007
2	1,822	0,007	1,784	0,003	1,654	0,012
3	1,157	0,015	1,374	0,008	1,328	0,003
4	1,010	0,005	1,101	0,013	1,022	0,006
5	0,945	0,014	0,889	0,007	0,795	0,006
6	0,697	0,019	0,680	0,011	0,684	0,012

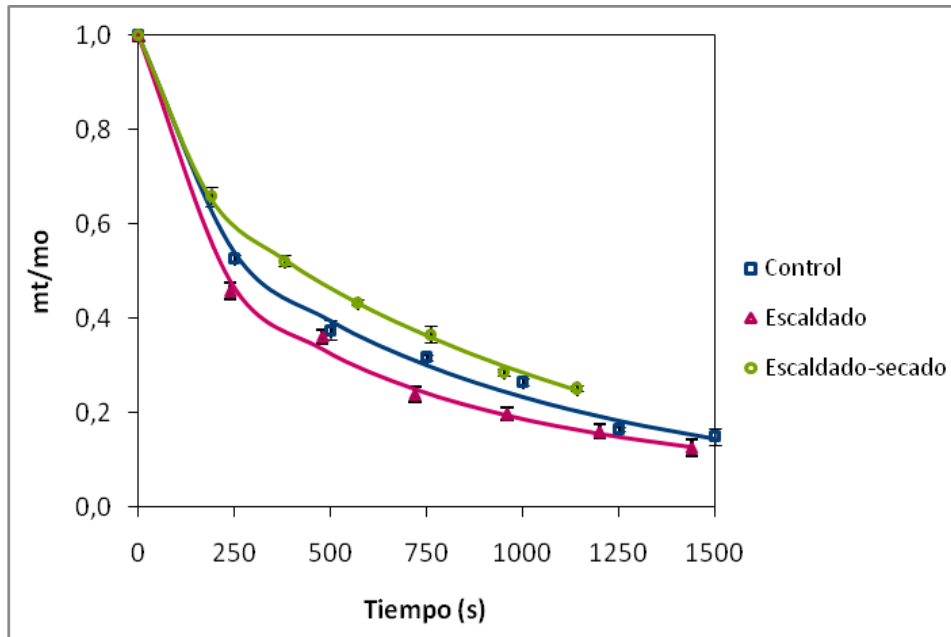


Figura A.2: Contenido de humedad adimensional ( $Mt$ ) durante la fritura de *French Fries* a  $140^{\circ}\text{C}$ . Los símbolos representan los datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.1.

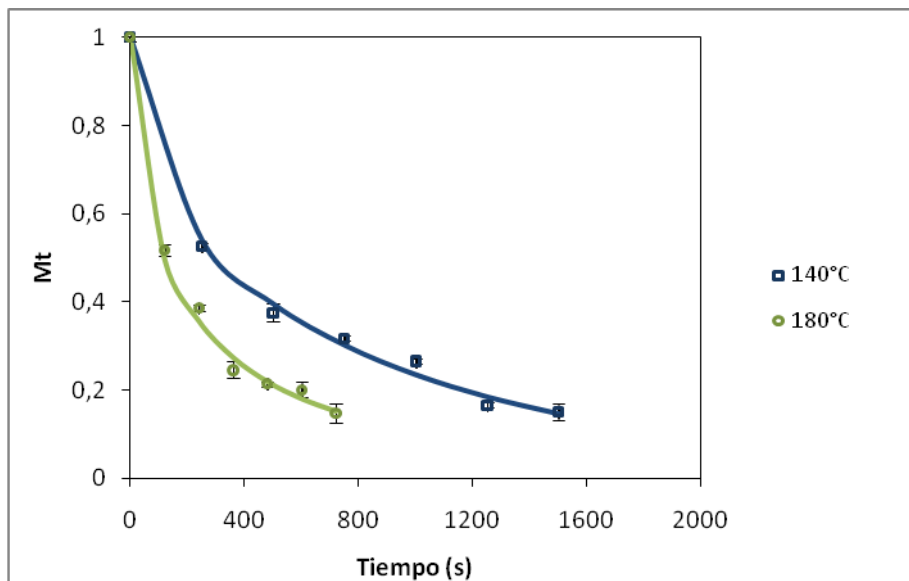


Figura A.3: Contenido de humedad adimensional ( $Mt$ ) durante la fritura de *French Fries* control. Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.1.

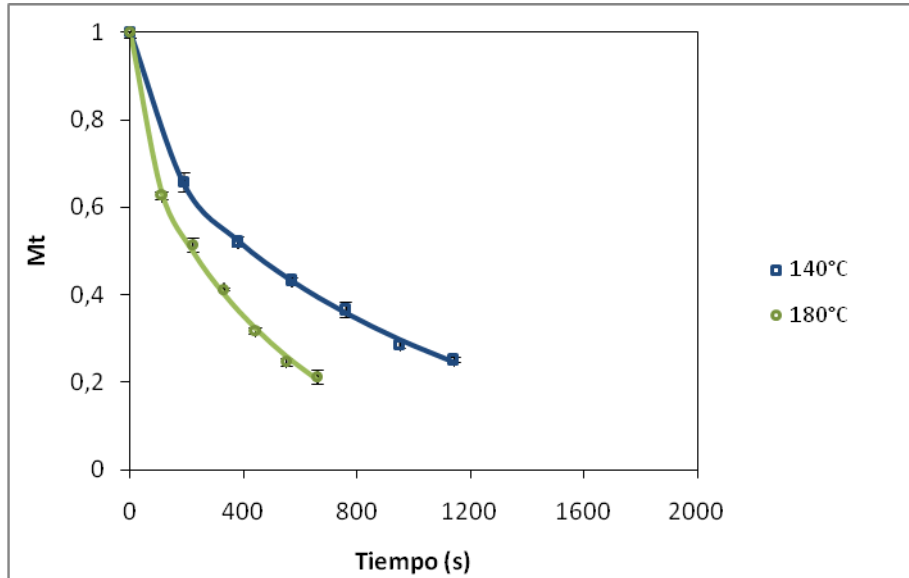


Figura A.4: Contenido de humedad adimensional ( $Mt$ ) durante la fritura de *French Fries* escaldadas-secadas. Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.1.

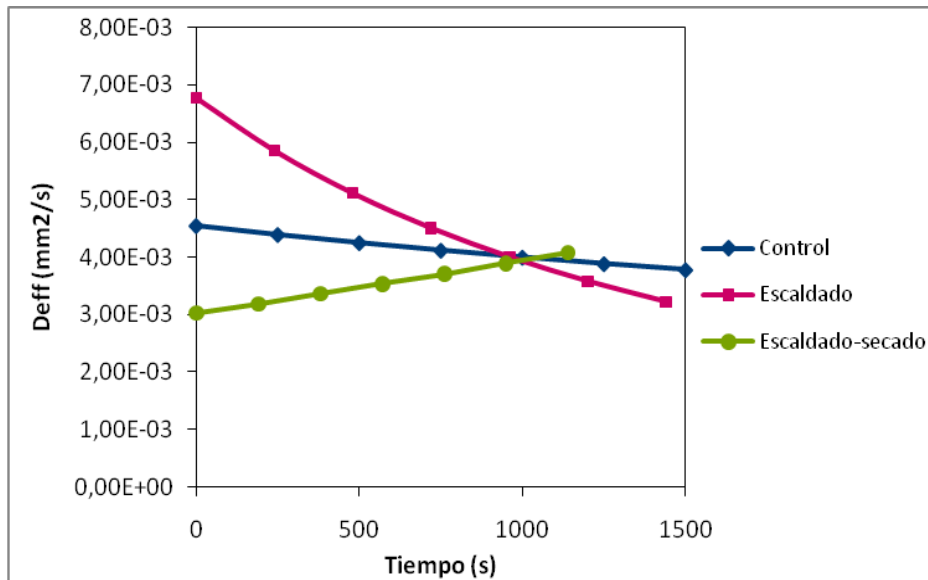


Figura A.5: Coeficiente de Difusividad Efectiva durante la fritura de papas a 140°C.

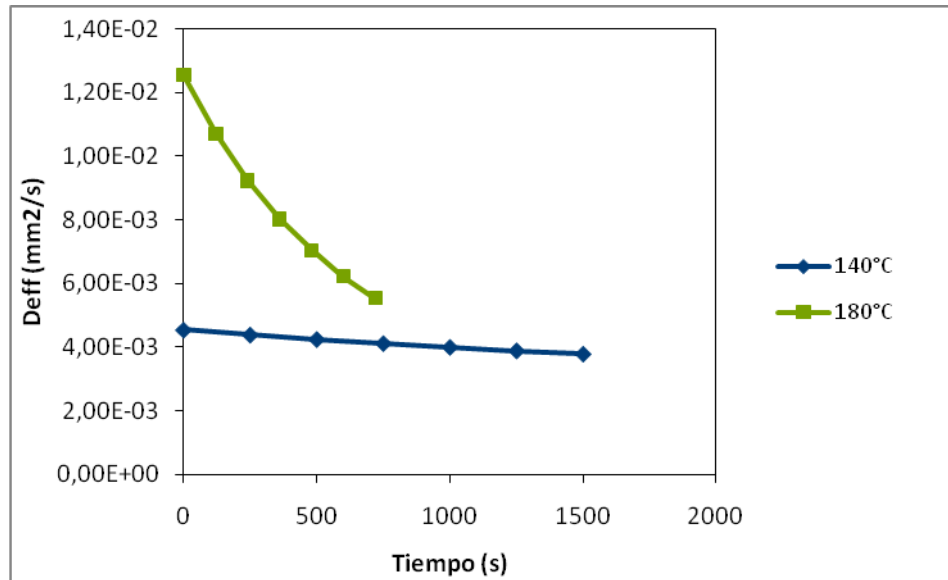


Figura A.6: Coeficiente de Difusividad Efectiva durante la fritura de papas control.

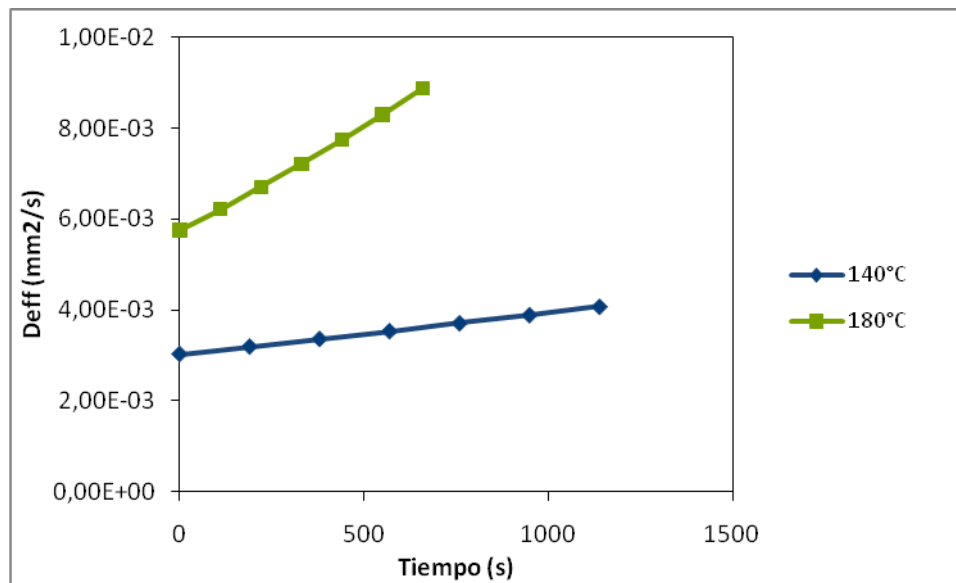


Figura A.7: Coeficiente de Difusividad Efectiva durante la fritura de papas escaldadas-secadas.



Tabla A.7: Absorción de aceite (base seca) para papas control, escaldado y escaldado-secado a 140°C. Resultados corresponden a promedio y desviación estándar.

Intervalo	Absorción de aceite (g aceite/g sólido seco)					
	Control		Escaldado		Escaldado-Secado	
	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,252	0,014	0,257	0,010	0,218	0,013
2	0,274	0,013	0,287	0,016	0,235	0,023
3	0,296	0,010	0,330	0,008	0,280	0,020
4	0,326	0,021	0,334	0,013	0,292	0,022
5	0,315	0,006	0,352	0,011	0,266	0,001
6	0,321	0,010	0,333	0,020	0,269	0,027

Tabla A.8: Absorción de aceite (base seca) para papas control, escaldado y escaldado-secado a 180°C. Resultados corresponden a promedio y desviación estándar.

Intervalo	Absorción de aceite (g aceite/g sólido seco)					
	Control		Escaldado		Escaldado-Secado	
	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$	$\bar{X}$	$\sigma$
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1	0,233	0,026	0,212	0,005	0,187	0,001
2	0,264	0,028	0,235	0,017	0,235	0,007
3	0,288	0,032	0,251	0,004	0,240	0,008
4	0,282	0,023	0,258	0,021	0,224	0,009
5	0,261	0,029	0,282	0,027	0,244	0,018
6	0,296	0,019	0,256	0,018	0,257	0,011

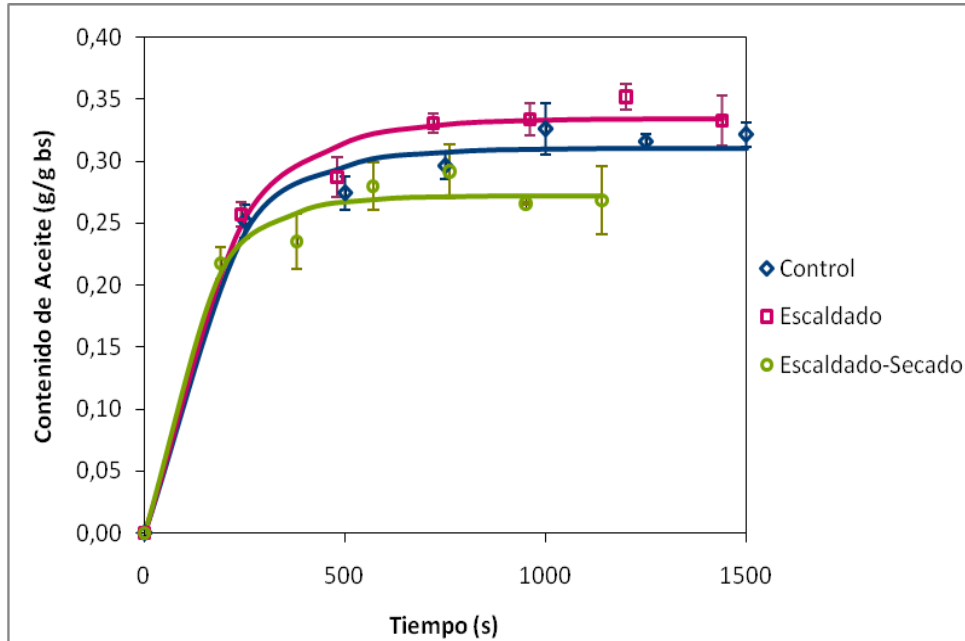


Figura A.8: Absorción de aceite durante la fritura a 140°C de papas *French Fries*. Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.3.

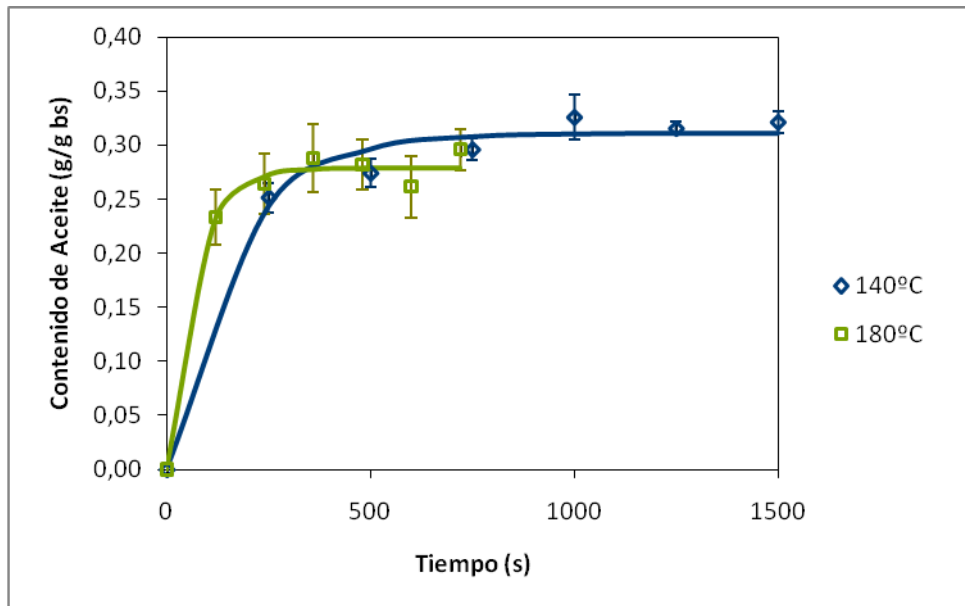


Figura A.9: Absorción de aceite durante la fritura de papas control. Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.3.

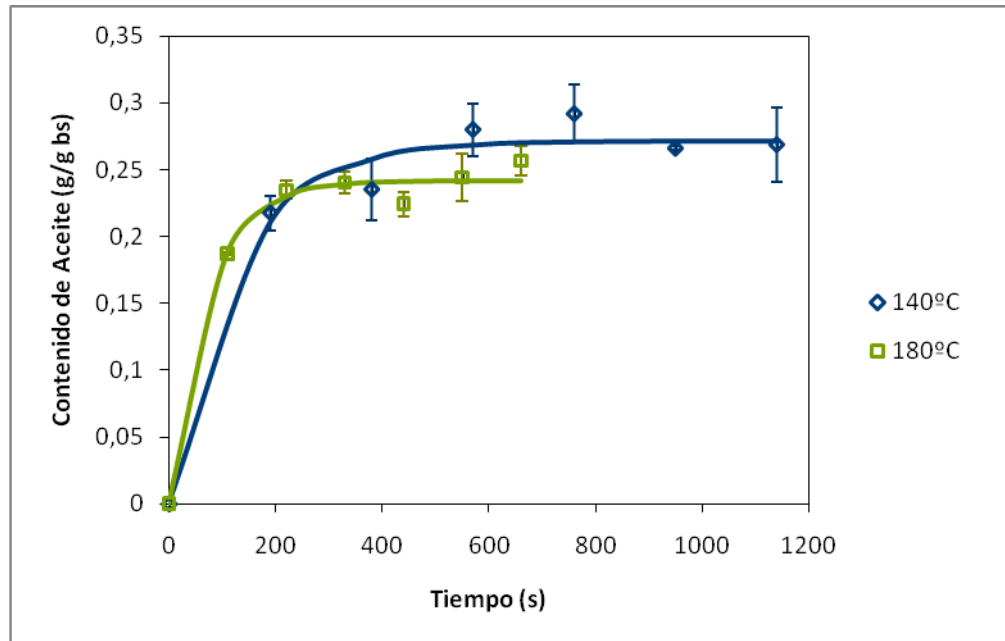


Figura A.10: Absorción de aceite durante la fritura de papas escaldadas-secadas. Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.3.

Tabla A.9: Fuerza máxima 1 y 2 (N) para papas control, escaldado y escaldado-secado a 140°C.

Intervalo	Fuerza máxima (N)					
	Control		Escaldado		Escaldado-Secado	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2
0	98,19		70,51		98,05	
1	35,76		27,45		48,91	
2	15,09	7,90	14,97	6,85	33,14	19,87
3	14,81	10,01	16,97	13,30	31,95	15,04
4	18,32	21,73	21,16	27,26	29,46	21,55
5	19,86	34,04	25,00	29,28	24,93	31,17
6	28,44	34,80	29,56	38,69	31,37	35,12

Tabla A.10: Fuerza máxima 1 y 2 (N) para papas control, escaldado y escaldado-secado a 180°C.

Intervalo	Fuerza máxima (N)					
	Control		Escaldado		Escaldado-Secado	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2
0	98,19		70,51		98,05	
1	35,04		26,44		47,21	
2	18,11	6,65	20,37	7,94	31,94	8,39
3	18,30	6,29	14,49	10,80	28,78	22,27
4	17,00	13,31	21,18	13,42	27,71	17,72
5	23,18	24,21	24,81	24,41	24,53	19,09
6	27,46	27,11	29,19	37,48	37,57	38,56

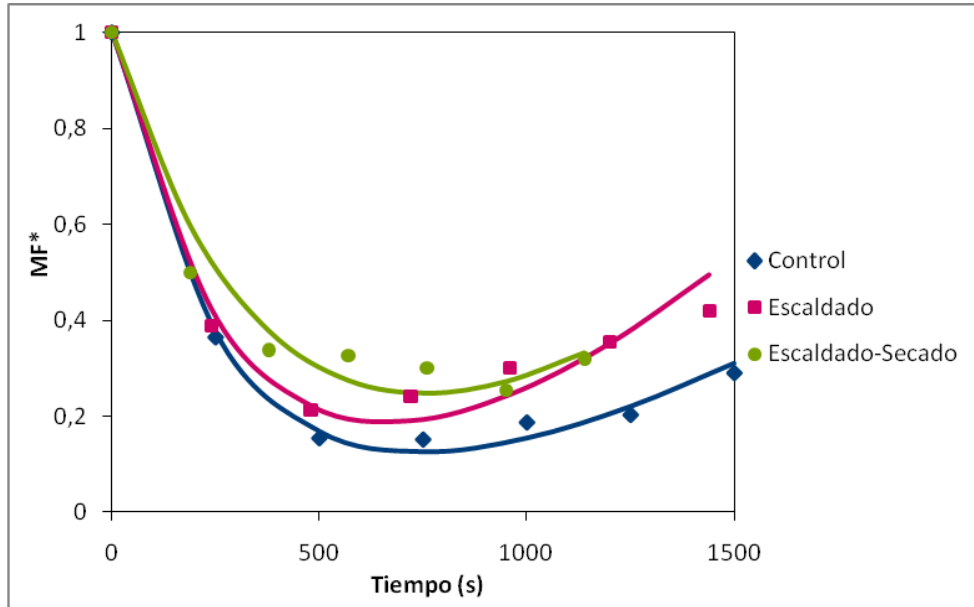


Figura A.11: Cinética de cambios texturales durante la fritura de papas *French Fries* a 140°C representado por la fuerza máxima adimensional (MF\*). Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.4.

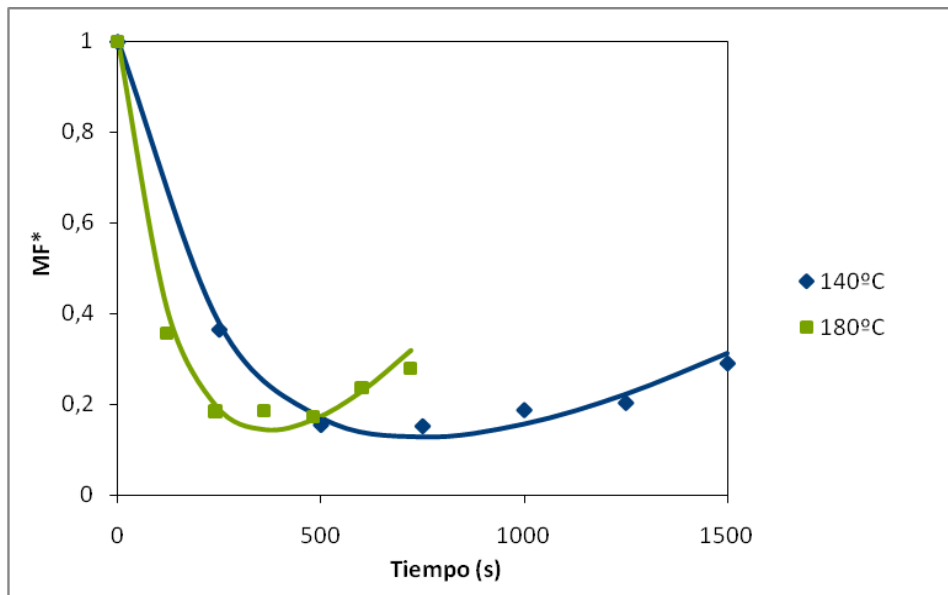


Figura A.12: Cinética de cambios texturales durante la fritura de papas *French Fries* control representado por la fuerza máxima adimensional (MF\*). Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.4.

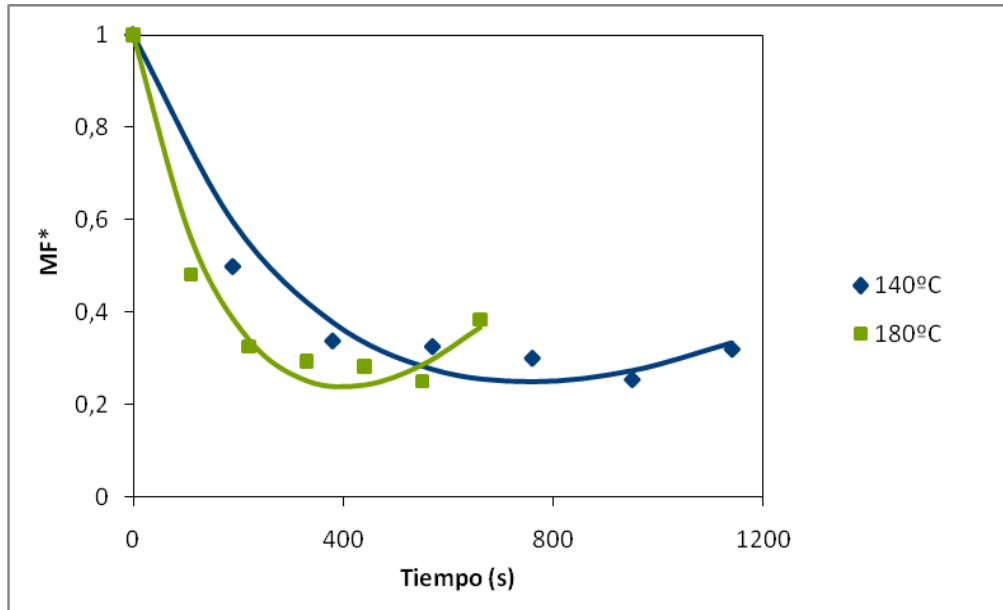


Figura A.13: Cinética de cambios texturales durante la fritura de papas *French Fries* escaldadas-secadas representado por la fuerza máxima adimensional ( $MF^*$ ). Los símbolos representan datos experimentales. Líneas sólidas representan los valores predichos por la Ecuación 2.4.

## Determinación de Calidad mediante Visión Computacional

Tabla A.11: Resultados obtenidos de la clasificación de imágenes según grado de calidad. Combinaciones entre variables temperatura y tratamientos.

Tratamiento	Temperatura (°C)	Nº características	% aciertos	Clasificador
C/E/ES	140/180	7	84,03	Bknn,4
C/E/ES	140	6	85,00	Bknn,4
C/E/ES	180	4	87,22	Bknn,4
C	140/180	10	87,08	Bnnglm,2
E	140/180	9	94,17	Bknn,4
ES	140/180	6	85,00	Bknn,4

C: Control

E: Escaldado

ES: Escaldado-Secado

## ANEXO 5: Rutina Matlab

### Extracción de características

Para el análisis de imágenes se utilizó el programa MATLAB, ejecutando el comando 'Bfex', generándose un cuadro como el que se muestra a continuación:

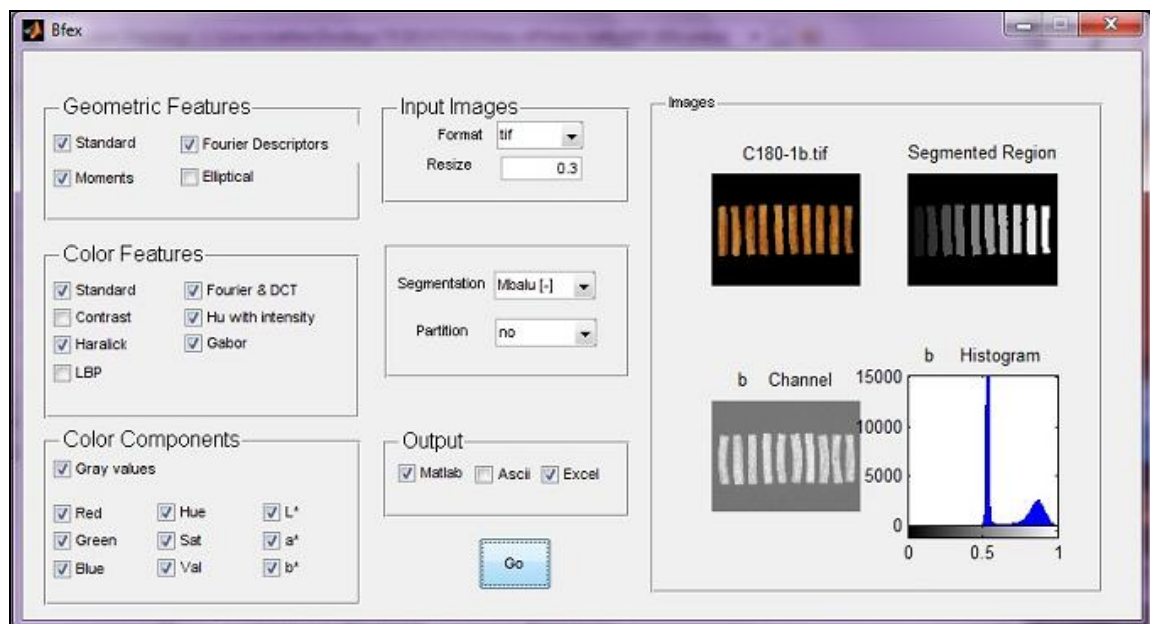


Figura A.14: Cuadro generado por comando 'Bfex' para la extracción de características de papas control *French Fries* a 180°C.

En este cuadro se escogieron los grupos de características que fueron extraídas (geométricas y de intensidad) y el formato (Matlab y Excel) que se usó para almacenar el gran conjunto de características extraídas.

El formato de las imágenes es Tif, que es la opción en donde la imagen está descomprimida, es decir, es la cantidad original de píxeles que posee la imagen. Con



respecto a su tamaño, las imágenes se redimensionaron a un 30% del tamaño total, optimizando el tiempo de análisis.

El análisis de imágenes de *French Fries* arrojó 2318 características extraídas, entregando una tabla de características, donde cada fila representa una muestra y cada columna una característica, ilustrado en un ejemplo en la Figura A.15.

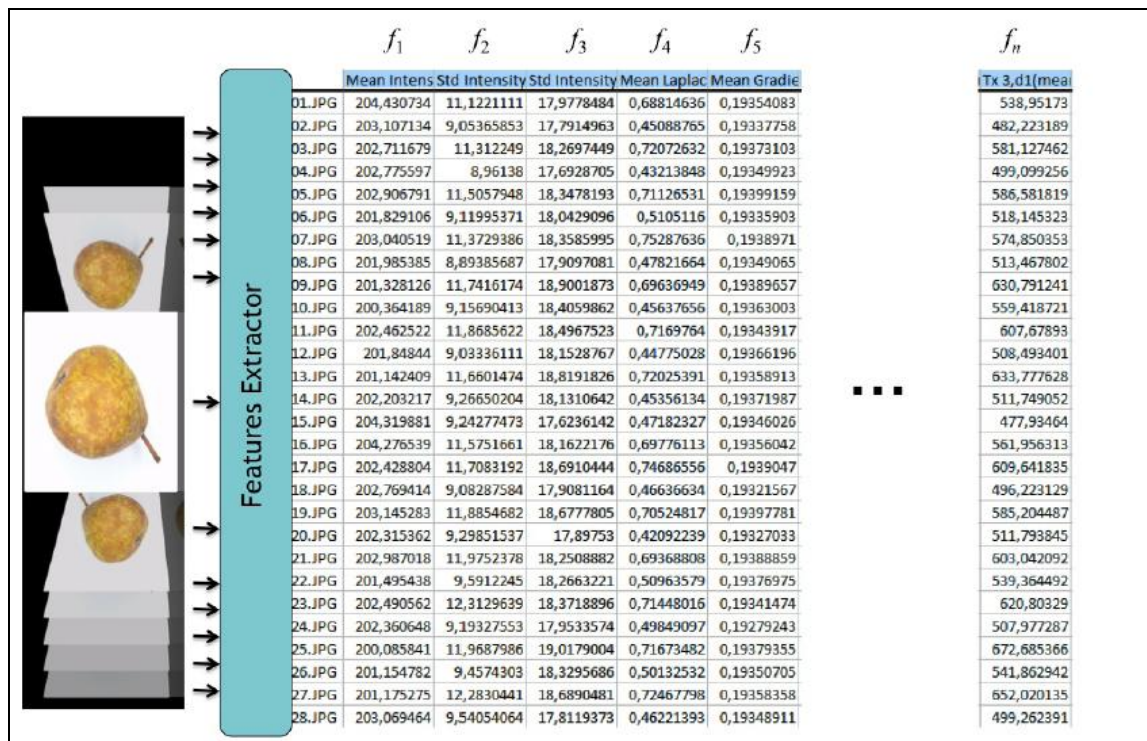


Figura A.15: Ejemplo de excel generado de la extracción de características de peras.

## Clasificación automática según color

Para efectuar la clasificación de las imágenes de chips de papas a partir del color, se trabajó con la planilla Excel en conjunto con el archivo matlab obtenido a partir de la extracción de características. Luego, a cada imagen se le asignó la categoría de calidad correspondiente obtenido de la evaluación sensorial.

Una vez logrado esto, se ejecutó el comando 'Bfcsel', generándose un cuadro como el que se presenta a continuación:

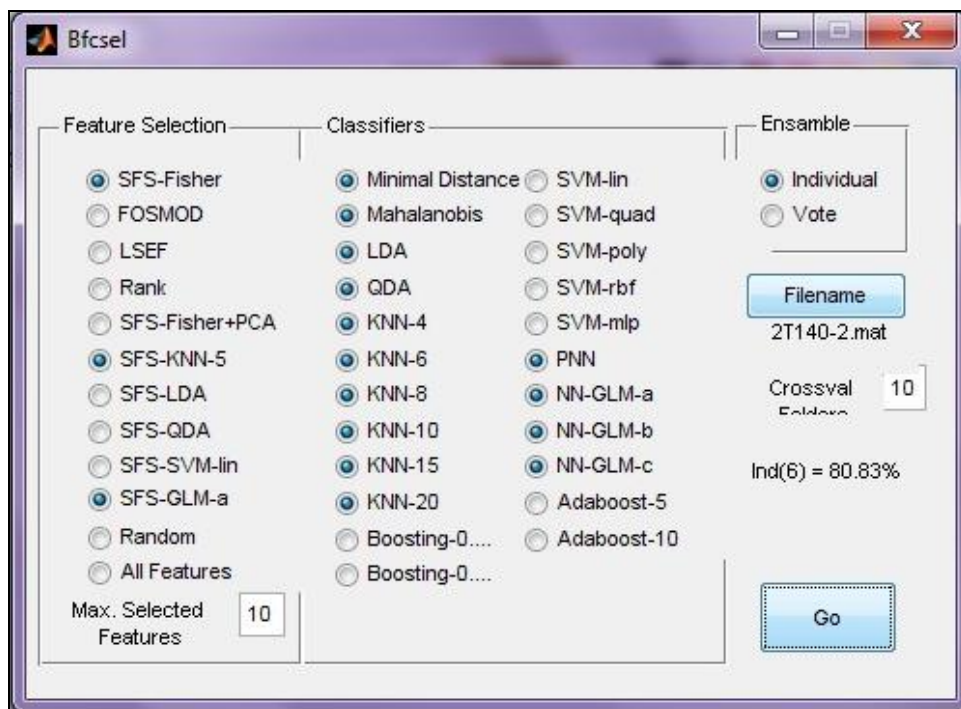


Figura A.16: Cuadro generado por comando 'Bfcsel' para la clasificación automática según color.

Los algoritmos para la selección de características y los clasificadores utilizados en esta investigación, fueron supervisados y determinados por el profesor Domingo Mery.

Los clasificadores supervisados basan su aprendizaje en un conjunto de datos de entrenamiento, mediante el cual, se proporciona al clasificador una serie de casos o situaciones con las que puede encontrarse al requerirse una predicción o clasificación de un nuevo objeto (Vázquez et al, 2005). Un clasificador asocia cada patrón de entrada a una de las tres clases predefinidas, para esto, se divide el espacio de entrada en regiones de decisión y todo lo que caiga dentro de cada región corresponderá a una clase diferente (Mery et al., 2010).

La selección de características se limitó a un máximo de 10, ya que se busca que el clasificador logre su objetivo con la menor cantidad de características de las 2318 extraídas, y para la validación cruzada se utilizó  $v = 10$  subconjuntos.