

Silvia Lorente Bailo

Caracterización de la cocción de alimentos en placa de inducción orientada al cocinado asistido

Director/es

Ferrer Mairal, Ana María
Salvador Solano, María Luisa

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606

Tesis Doctoral

**CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE
ALIMENTOS EN PLACA DE INDUCCIÓN
ORIENTADA AL COCINADO ASISTIDO**

Autor

Silvia Lorente Bailo

Director/es

Ferrer Mairal, Ana María
Salvador Solano, María Luisa

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Escuela de Doctorado

Programa de Doctorado en Calidad, Seguridad y Tecnología de los
Alimentos

2023

Tesis Doctoral

Caracterización de la cocción de alimentos en placa
de inducción orientada al cocinado asistido

Silvia Lorente Bailo

Directoras

Ana María Ferrer Mairal

María Luisa Salvador Solano

A mi hija Emma

Agradecimientos

Llegado este momento quiero dar las gracias a todas las personas que han contribuido de alguna manera en la realización de esta Tesis Doctoral:

En primer lugar, quería dar las gracias a mis directoras de tesis, la Dra. M^a Luisa Salvador y la Dra. Ana Ferrer Mairal por haber confiado en mí y por vuestra dirección durante estos años. Gracias Marisa, por tu gran capacidad de resolución, dedicación y tu visión global. Gracias Ana por haberme dado la oportunidad de entrar en el mundo de la investigación y por todo lo que me has enseñado durante todos estos años. Gracias por vuestro esfuerzo y por el apoyo que me habéis ofrecido.

A la Dra. Rosa Oria, gracias por permitirme pasar estos años en tu grupo de investigación, en el que me he sentido muy a gusto trabajando, y por ser la responsable de organizar muchas de las celebraciones que guardo en el recuerdo.

Al Dr. Ignacio Negueruela y Concha Urzola por ayudarme a ampliar mis conocimientos sobre el análisis de color. A la Dra. Ana Cristina Sánchez por tu gran ayuda con la reología.

Gracias también a la Dra Sara Remón, Dra. Esther Arias, Dra. M^a Eugenia Venturini, Dr. Domingo Blanco, Dr. José M^a Peiró, Dr. Jaime González y Dra. Eva Campo por vuestra ayuda y disponibilidad durante todos estos años.

Quería dar gracias al equipo de BSH con el que hemos colaborado durante el desarrollo de esta Tesis Doctoral enmarcada en el proyecto “Nuevas tecnologías de calentamiento y control aplicado a electrodomésticos para mejorar la Experiencia de Usuario” (Proyecto RTC-2017-5965-6, ARQUE). Gracias por el apoyo y seguimiento en la consecución de los experimentos realizados en el proyecto.

También gracias al Grupo Applied Mechanics and Bioengineering - AMB- (T24-17R) dirigido por Begoña Calvo. Gracias por vuestra ayuda y disponibilidad.

Por supuesto, gracias a mis compis de tesis Ana Pilar y Gimi. No he podido tener mejores compañeros. Hemos pasado muy buenos ratos que me llevo en el recuerdo. Gracias Ana Pilar porque eres la alegría personificada con un gran corazón y siempre tan predispuesta para ayudar. Gimi, gracias por los momentos tan divertidos que hemos pasado y también por ayudarme y animarme cuando lo he necesitado. Os echo de menos.

También quiero agradecer a los compañeros de laboratorio que estaban al principio y me acogieron como una más: Diego, Sofía, Guillermo, María, Carol, Pedro, Elena, Tere y Montse. En especial a Leyre, gracias por ayudarme en mis inicios, y por esos momentos que hacías que fueran tan divertidos. Y a los que fueron llegando luego: Héctor e Isa. Gracias a Gustavo y a Alberto, porque vuestros trabajos previos en el grupo me han ayudado en la realización de esta tesis. Gracias a todos por vuestra ayuda.

Al resto de personas del departamento de Tecnología de Alimentos, profesores y becarios, en especial a Dani, Ana Tobajas y Virginia. Os agradezco vuestro apoyo y amabilidad durante estos años.

Quiero agradecer también a Carmen y Silvana vuestra amabilidad, y también gracias al personal de la Planta Piloto, Ana, Antonio y Lourdes, por vuestra ayuda cuando la he necesitado.

También quiero dar las gracias a mis amigas de siempre: Yaiza, Natalia, Laura e Inés. A mis amigas de balonmano: Ana, Tere, Raquel, Esther y Fani. A mis amigos de la uni: Andrea, Nico, Jorge, Viejo, Ana, Reinado, Silvia, Raquel Guiu y Lario. A Pedro y Johana. Y a mis naranjitas. Muchas gracias por todos los buenos ratos que hemos compartido y por hacerme desconectar cuando lo necesitaba.

Esta Tesis no estaría terminada sin la ayuda de toda mi familia especialmente la de mis padres, gracias por estar siempre cuando os he necesitado, por apoyarme y aconsejarme. Soy muy afortunada de tener unos padres como vosotros, os quiero mucho. Muchas gracias también por cuidar tan bien a Emma, supliendo mis ausencias con creces. Gracias a mi hermano y a Vero por apoyarme y ayudarme siempre. A mis suegros, cuñado y sobrinos Guille y Darío, gracias por ayudarme cuando lo he necesitado. Al resto de mi familia, gracias.

A Sergio, gracias por cuidarme, apoyarme y confiar en mí, incluso más de lo que lo hago yo. Gracias por comprender todos los sacrificios que esta Tesis ha significado y por aportarme calma cuando más lo necesito. Gracias por estar ahí siempre.

Por último, gracias Emma, sin duda eres lo mejor que me ha pasado en la vida y siempre lo serás, eres la alegría de la casa y de nuestras vidas. Te quiero muchísimo mi niña.

ÍNDICE



RESUMEN	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	3
1.1 ANTECEDENTES.....	5
1.2 OBJETIVOS	6
1.3 DESARROLLO	7
1.3.1 Caracterización de la carne cocinada por contacto con una superficie caliente.	7
1.3.2 Caracterización de panqueques por contacto con una superficie caliente.	9
1.3.3 Caracterización de la pasta cocinada en medio acuoso	10
1.3.4 Caracterización de los vegetales cocinados en medio acuoso	11
CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 CAMBIOS EN LA CARNE DURANTE EL COCINADO	15
2.1.1 Cambios en el color de la carne durante el cocinado	15
2.1.2 Cambios en la textura de la carne durante el cocinado	25
2.1.2.1 Composición y estructura de la carne.....	25
2.1.2.2 Cambios estructurales de la carne durante el cocinado	27
2.1.2.3 Dureza de la carne	29
2.1.3 Cambios en el contenido en agua de la carne durante el cocinado	31
2.1.4 Estimación y predicción de los cambios en la carne durante el cocinado	33
2.2 CAMBIOS EN LOS PANQUEQUES DURANTE EL COCINADO	39
2.2.1 Cambios en el color de los panqueques durante el cocinado.....	39
2.2.1.1 Medida del color.....	44
2.2.2 Cambio en el contenido en agua durante el cocinado de los panqueques	48
2.2.3 Cambio de las propiedades reológicas durante el cocinado de panqueques	50
2.2.3.1 Tipo de masas y relación con la microestructura	52
2.2.3.2 Comportamiento reológico de las masas	55
2.2.4 Estimación y predicción de los cambios en los panqueques durante el cocinado....	58
2.3 CAMBIOS EN LA PASTA DURANTE EL COCINADO	62
2.3.1 Cambio de la estructura en la pasta durante el cocinado	62
2.3.1.1 Papel del almidón y de las proteínas en la pasta.....	62
2.3.1.2 Cambios durante el cocinado.....	69
2.3.2 Propiedades de cocción de la pasta	74
2.3.3 Cambios de las propiedades nutricionales de la pasta durante el cocinado.....	75

2.3.3.1	Índice glucémico	75
2.3.3.2	Almidón resistente.....	77
2.3.4	Estimación y predicción de los cambios en la pasta durante la cocción	80
2.4	CAMBIOS EN LOS VEGETALES DURANTE EL COCINADO	85
2.4.1	Cambio en la textura de los vegetales durante el cocinado	85
2.4.1.1	Estructura de los vegetales	85
2.4.1.2	Cambios estructurales de los vegetales durante el cocinado	86
2.4.2	Cambios del color de los vegetales durante el cocinado.....	89
2.4.2.1	Cambios en la clorofila.....	90
2.4.3	Cambios de las propiedades nutricionales de los vegetales durante el cocinado....	92
2.4.4	Estimación y predicción de los cambios en los vegetales durante la cocción.....	97
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....		101
3.1	EQUIPOS DE COCCIÓN	103
3.1.1	Placas de inducción.....	103
3.1.2	Ensayos para caracterizar las placas de inducción	104
3.2	CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE LA CARNE POR CONTACTO CON UNA SUPERFICIE CALIENTE	105
3.2.1	Carne	106
3.2.2	Sistema experimental y condiciones de cocinado de la carne.....	106
3.2.3	Ensayos de cocinado de carne.....	108
3.2.3.1	Ensayos para caracterizar los diferentes grados de cocción	108
3.2.3.2	Ensayos para determinar la influencia del método de conservación de la carne en las propiedades de la carne cocinada.	108
3.2.3.3	Ensayos para analizar la influencia del tamaño y grosor de la carne en el grado de cocción	109
3.2.3.4	Ensayos para analizar la influencia de la temperatura de la sartén, la temperatura inicial de carne en el grado de cocción, y del número de piezas en la cocción	109
3.2.4	Ensayos para determinar en la carne el contenido de agua en el equilibrio	110
3.2.5	Ensayos para determinar la cinética de cambio de color de la carne	110
3.2.6	Análisis físico-químico de la carne.....	111
3.2.6.1	Humedad	111
3.2.6.2	Determinación del pH	112
3.2.6.3	Capacidad de retención de agua por compresión	112

3.2.6.4	Análisis de textura	112
3.2.6.5	Análisis de imágenes termográficas	114
3.2.6.6	Análisis de color	115
3.2.6.7	Análisis de las propiedades reológicas de la carne.....	117
3.3	CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE PANQUEQUES POR CONTACTO CON UNA SUPERFICIE CALIENTE	118
3.3.1	<i>Masa del panqueque</i>	118
3.3.2	<i>Sistema experimental y condiciones de cocinado de los panqueques</i>	119
3.3.3	<i>Ensayos de cocinado de los panqueques</i>	120
3.3.3.1	Ensayos previos para establecer las condiciones de cocción	120
3.3.3.2	Ensayos para determinar el criterio a adoptar para dar la vuelta al panqueque..	121
3.3.3.3	Ensayos para caracterizar la cocción de panqueques de diferente composición	122
3.3.4	<i>Ensayos para determinar la cinética de cambio de color y humedad de los panqueques</i>	123
3.3.4.1	Determinación del color del panqueque	124
3.3.4.2	Determinación de la humedad del panqueque.....	125
3.3.5	<i>Análisis físico-químico de los panqueques</i>	125
3.3.5.1	Propiedades de hidratación de las harinas utilizadas en la elaboración de las masas	125
3.3.5.2	Análisis reológico de las masas	126
3.3.5.3	Gravedad específica de las masas.....	128
3.3.5.4	Análisis de imágenes termográficas	128
3.3.5.5	Análisis de color	128
3.4	CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE PASTA POR INMERSIÓN EN AGUA HIRVIENDO	130
3.4.1	<i>Pasta</i>	130
3.4.2	<i>Sistema experimental y condiciones de cocinado de la pasta</i>	131
3.4.3	<i>Ensayos de cocinado de la pasta</i>	132
3.4.3.1	Ensayos para analizar la influencia de la potencia en las propiedades de la pasta	132
3.4.3.2	Ensayos para analizar la repercusión de la relación pasta/agua y de la agitación en las propiedades de la pasta	133

3.4.3.3 Ensayos para analizar la influencia de la composición en las propiedades de la pasta cocida.....	133
3.4.4 <i>Análisis físico-químico de la pasta</i>	135
3.4.4.1 Propiedades de cocinado de la pasta	135
3.4.4.2 Grado de gelatinización del almidón (G)	136
3.4.4.3 Materia orgánica total (TOM)	137
3.4.4.4 Turbidez del agua de cocción (T).....	138
3.4.4.5 Textura.....	138
3.4.4.6 Análisis digital de la imagen	139
3.4.5 <i>Contenido en almidón resistente</i>	140
3.5 CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE VEGETALES POR INMERSIÓN EN AGUA HIRVIENDO	141
3.5.1 <i>Vegetales</i>	142
3.5.2 <i>Sistema experimental y condiciones de cocinado</i>	142
3.5.3 <i>Ensayos de cocinado de los vegetales</i>	142
3.5.4 <i>Análisis físico-químico</i>	143
3.5.4.1 Humedad	143
3.5.4.2 Textura.....	143
3.5.4.3 Color.....	144
3.5.4.4 Contenido en clorofilas	144
3.5.4.5 Medida de la conductividad eléctrica del agua de cocción de los vegetales	145
3.5.5 <i>Análisis de parámetros relacionados con el valor nutricional</i>	145
3.5.5.1 Contenido en fenoles totales.....	145
3.5.5.2 Capacidad antioxidante	146
3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	146
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	149
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE CARNE POR CONTACTO CON UNA SUPERFICIE CALIENTE	151
4.1.1 <i>Percepción de los grados de cocción por los consumidores</i>	151
4.1.2 <i>Cinética del cambio de color de la carne</i>	154
4.1.3 <i>Caracterización de los grados de cocinado</i>	158
4.1.3.1 El color como indicador del grado de cocción	161
4.1.3.2 La pérdida de peso como indicador del grado de cocción.....	165
4.1.4 <i>Influencia de la conservación previa en las propiedades de la carne cocinada</i>	169

4.1.4.1	Caracterización de las muestras antes del tratamiento culinario	169
4.1.4.2	Influencia de las condiciones de conservación en la cinética de cambio de color de la carne.....	172
4.1.4.3	Influencia de las condiciones de conservación en el color de la carne cocinada	173
4.1.4.4	Influencia de las condiciones de conservación de la carne en la pérdida de peso durante el cocinado.....	174
4.1.4.5	Influencia de las condiciones de conservación de la textura de la carne cocinada	176
4.1.5	<i>Influencia de las condiciones de cocinado en el grado de cocción.....</i>	<i>178</i>
4.1.5.1	Influencia de la temperatura inicial de la carne.....	178
4.1.5.2	Influencia de la temperatura de la sartén.....	181
4.1.5.3	Influencia del número de piezas	182
4.1.6	<i>Modelado matemático del cocinado de carne de ternera por contacto con una superficie caliente.....</i>	<i>183</i>
4.1.6.1	Descripción y suposiciones del modelo	184
4.1.6.2	Parámetros de entrada del modelo determinados experimentalmente.....	187
4.1.6.3	Validación del modelo.....	192
4.1.6.4	Utilidad del modelo para la asistencia al cocinado.....	199
4.2	CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE PANQUEQUES POR CONTACTO CON UNA SUPERFICIE CALIENTE	202
4.2.1	<i>Cinética de cambio de color del panqueque.....</i>	<i>202</i>
4.2.2	<i>Asistencia al cocinado: selección de criterios para dar la vuelta al panqueque ...</i>	<i>215</i>
4.2.2.1	Caracterización del proceso de cocción de los panqueques.	215
4.2.2.2	Criterios para establecer la acción de dar la vuelta al panqueque	222
4.2.3	<i>Modelado matemático del cocinado de panqueques por contacto con una superficie caliente incorporando las propiedades reológicas de las masas. Aplicación a panqueques de diferente composición</i>	<i>225</i>
4.2.3.1	Propiedades físicoquímicas de las diferentes harinas utilizadas en la elaboración de las masas.....	227
4.2.3.2	Propiedades reológicas de las masas	228
4.2.3.3	Evolución de la temperatura y la pérdida de peso durante el cocinado de las masas	233
4.2.3.4	Descripción y suposiciones del modelo	235
4.2.3.5	Optimización de las variables del modelo.....	238

4.2.3.6 Verificación y validación del modelo.....	241
4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE PASTA POR INMERSIÓN EN AGUA	
HIRVIENDO.....	244
4.3.1 <i>Temperatura del agua de cocción</i>	245
4.3.2 <i>Tiempo óptimo de cocción (OCT)</i>	246
4.3.3 <i>Influencia de la potencia en la calidad de la pasta</i>	248
4.3.3.1 Evolución de las propiedades de cocinado de la pasta durante la cocción...	248
4.3.3.2 Evolución de la textura de la pasta durante la cocción.....	263
4.3.3.3 Parámetros de calidad de la pasta al tiempo óptimo de cocción.....	265
4.3.4 <i>Influencia en la relación pasta:agua en la calidad de la pasta</i>	266
4.3.5 <i>Influencia de la agitación en la calidad de la pasta</i>	269
4.3.6 <i>Influencia de la potencia aplicada durante la cocción en la calidad de pastas de diferente composición</i>	271
4.3.6.1 Contenido en almidón resistente de la pasta cocinada a diferentes potencias....	
.....	274
4.4 CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE VEGETALES POR INMERSIÓN EN AGUA	
HIRVIENDO.....	277
4.4.1 <i>Efecto de la potencia suministrada durante la cocción en la calidad de los vegetales hervidos</i>	278
4.4.1.1 Humedad y textura	278
4.4.1.2 Color y contenido en clorofilas	279
4.4.1.3 Contenido de fenoles totales y capacidad antioxidante.....	282
4.4.2 <i>Efecto de la potencia suministrada durante la cocción en la lixiviación de nutrientes</i>	284
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	289
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFIA.....	295

RESUMEN

El cocinado de los alimentos es una operación culinaria que pretende, mediante la aplicación de calor, facilitar alimentos seguros, digeribles y sensorialmente aceptables. En el entorno doméstico, una alternativa es el calentamiento por inducción. Las últimas innovaciones en las placas de inducción se orientan a la búsqueda de flexibilidad y del control del cocinado. La asistencia al cocinado pretende obtener soluciones, basadas en un mayor conocimiento de las transformaciones del alimento, en la información obtenida del propio sistema y de fuentes externas, que permitan asegurar la calidad del alimento cocinado y mejorar la eficiencia y seguridad de uso.

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral fue caracterizar los cambios físico-químicos, organolépticos y nutricionales que experimentan diferentes matrices alimentarias durante su cocinado, con el propósito de proporcionar información útil para la asistencia al cocinado en placas de inducción. Este trabajo se centró en dos métodos de cocción, cocción en medio acuoso y cocción por contacto con una superficie caliente. Para cada método de cocción se estudiaron dos alimentos: carne y panqueque para la cocción por contacto con una superficie caliente, y pasta y vegetales para la cocción en medio acuoso. Para alcanzar el objetivo principal se determinó la influencia de las propiedades iniciales de los alimentos y de diferentes condiciones de cocción, tanto en el comportamiento durante el cocinado como en la calidad final de los alimentos. En primer lugar, se puso a punto un sistema experimental que permitía la monitorización en continuo de diferentes parámetros durante el cocinado por contacto con una superficie caliente para evaluar el estado del producto durante y tras la cocción.

Para el estudio del cocinado de carne sobre una superficie caliente, se caracterizaron diferentes grados de cocción para distintos grosores y tamaños de carne de ternera. De este estudio se pudo concluir que la pérdida de peso es un parámetro útil para estimar los tiempos que cada grado de cocción requiere, adaptándolos a las dimensiones de la pieza cárnica. También se analizó la influencia de diferentes condiciones de conservación de la carne de ternera propias del ámbito doméstico en el comportamiento durante el cocinado y en la calidad final. Además, se realizaron ensayos a temperatura controlada con los que se pudo obtener la cinética de cambio de color de la carne y analizar los cambios reológicos y en la capacidad de retención de agua derivados del

calentamiento. Los datos obtenidos de los ensayos a temperatura controlada se incluyeron en un modelo numérico de elementos finitos lo que permitió predecir la evolución de la temperatura y del color en el interior de la carne durante el cocinado y determinar el tiempo más adecuado de giro para lograr que la carne se cocine uniformemente por ambos lados.

La caracterización del proceso de cocinado por contacto con una superficie caliente de los panqueques se centró fundamentalmente en evaluar el efecto de la incorporación de harinas de diferente composición en las propiedades reológicas de las masas y en su comportamiento durante la cocción. También se determinó la cinética de cambio de color de los panqueques. Se desarrolló un modelo matemático que tiene en cuenta la dependencia de la velocidad de evaporación y de la conductancia con la evolución de la viscosidad de las masas durante el calentamiento. Con este modelo se consiguió predecir la pérdida de peso de los diferentes panqueques.

La caracterización del proceso de cocción de pasta en medio acuoso se orientó al estudio de las propiedades de cocción y de la textura de la pasta cuando se cocinaba aplicando diferentes potencias, utilizando distintas relaciones pasta:agua, así como variando la composición y la forma de la pasta. De esta forma, se pudo concluir que es posible cocinar la pasta de una forma más sostenible sin alterar sustancialmente la calidad del producto.

Por último, también se analizó la influencia de la potencia de inducción durante el cocinado en medio acuoso de diferentes vegetales en la calidad final de los mismos. Los compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante de algunos vegetales (alcachofas, acelgas y brócoli) se retienen en mayor medida cuando se cocinan a la potencia de calentamiento más baja posible para mantener la ebullición, asociado a una disminución en la cantidad de compuestos lixiviados tal y como indicó el seguimiento de la evolución de la conductividad eléctrica del agua de cocción.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES Y OBJETIVOS



1.1 ANTECEDENTES

La presente Tesis Doctoral se enmarca dentro de los trabajos realizados por el Grupo de Investigación en Alimentos de Origen Vegetal (GIAOVE) de la Universidad de Zaragoza, en la línea de investigación de tecnologías culinarias. Desde el año 2004 y hasta el año 2009 la Diputación General de Aragón financió al Grupo el proyecto ALCOTEC (Alta COcina y TECnología), con el fin de dotar a la Comunidad aragonesa de una unidad de apoyo a la creación gastronómica e investigar sobre el desarrollo de nuevas tecnologías en la cocina creando una colaboración entre el ámbito culinario y científico. Este proyecto supuso para el grupo de investigación el impulso definitivo para la consolidación de esta línea de trabajo.

En el marco de esta línea de investigación, y debido al interés de la industria en estudiar la influencia de diferentes condiciones de cocinado en los alimentos, se establecieron colaboraciones con varias empresas. Uno de los vínculos más consolidados, es el existente desde el año 2008 con la empresa BSH Electrodomésticos España, desarrollando varios proyectos de investigación entre los que se encuentra “Nuevas tecnologías de calentamiento y control aplicado a electrodomésticos para mejorar la Experiencia de Usuario” (Proyecto RTC-2017-5965-6, ARQUE). La investigación de la presente tesis doctoral se ha realizado en el marco de dicho proyecto. En el proyecto ARQUE participan la empresa BSH Electrodomésticos España S.A. (BSH) y ocho grupos de investigación de la Universidad de Zaragoza, uno de los cuales es el grupo GIAOVE.

El proyecto ARQUE, pretende contribuir a la evolución tecnológica de las placas de inducción que BSH desarrolla y fabrica. Atendiendo a las expectativas del mercado, se abordan varias líneas de trabajo orientadas a que las cocinas de inducción (incluyendo recipientes y accesorios) presenten un comportamiento más autónomo y más eficiente con el fin de mejorar la experiencia de usuario. El objetivo principal del proyecto es desarrollar soluciones tecnológicas orientadas a cocinas de inducción domésticas que aporten mayor autogestión al aparato para un uso más eficiente, así como mejorar la experiencia de cocinado por parte del usuario. Para ello es imprescindible establecer parámetros medibles durante la cocción de los alimentos que proporcionen información sobre el grado de cocinado y la calidad organoléptica y nutricional de los mismos, que

supongan una contribución al avance hacia el cocinado asistido. En este marco, se plantearon los siguientes objetivos de esta Tesis Doctoral que se detallan a continuación.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de esta Tesis doctoral es caracterizar los cambios físico-químicos, organolépticos y nutricionales que experimentan diferentes matrices alimentarias durante su cocinado, con el objetivo de proporcionar información útil para la asistencia al cocinado. Esta investigación se centrará en el estudio de dos métodos de cocinado utilizando placas de inducción como método de calentamiento: cocción en medio acuoso y cocción por contacto con una superficie caliente.

Este objetivo principal puede dividirse en dos objetivos parciales:

1. Determinar la influencia de las condiciones de cocción en el comportamiento durante el cocinado y en la calidad final de diferentes alimentos. Para ello, se plantearon los siguientes objetivos específicos:
 - Caracterizar los diferentes grados de cocinado de la carne.
 - Estudiar la influencia de la potencia de calentamiento en la calidad de diferentes vegetales y de pasta cocinados en medio acuoso.
 - Estudiar la influencia de la potencia de calentamiento por contacto con superficie caliente en la calidad de los panqueques.
2. Analizar el efecto de las propiedades iniciales de los alimentos en el comportamiento durante el cocinado. Para ello, se planteó el estudio de los siguientes aspectos específicos:
 - El efecto de diferentes formulaciones de panqueques.
 - La composición y geometría de la pasta.
 - Las condiciones de conservación de la carne
 - Las dimensiones de las piezas de carne.

1.3 DESARROLLO

Para la consecución de los citados objetivos, se planteó un desarrollo experimental centrado en dos matrices alimentarias para cada método de cocción. Carne y panqueques fueron seleccionados para cocción por contacto con superficie caliente, mientras que la pasta y los vegetales se eligieron para la cocción en medio acuoso. En todos los casos el calentamiento se llevó a cabo mediante placa de inducción.

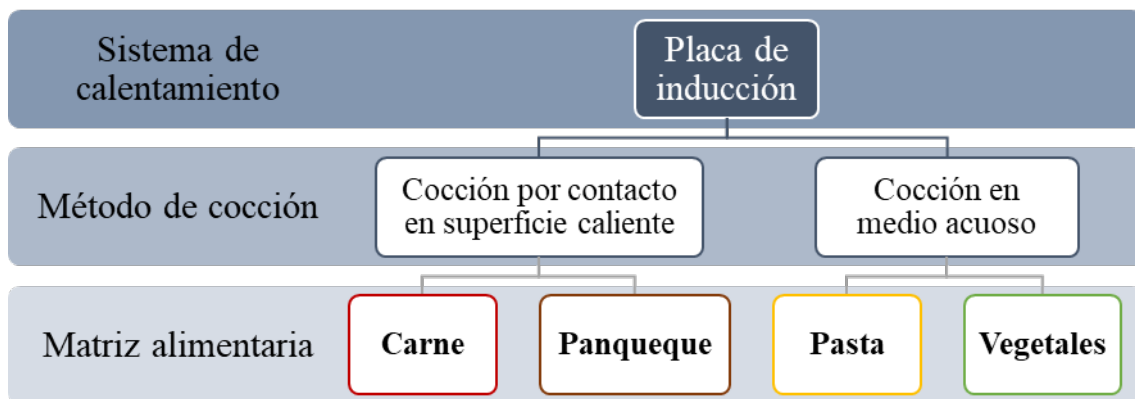


Figura I- 1. *Desarrollo del estudio*

1.3.1 Caracterización de la carne cocinada por contacto con una superficie caliente.

En primer lugar, se puso a punto un sistema experimental que permitiese la monitorización en continuo durante el cocinado de la pérdida de peso, de la temperatura en diferentes puntos del interior del alimento y de la distribución de temperaturas en la superficie del alimento mediante imágenes termográficas. Paralelamente, se realizó un estudio con consumidores mediante encuestas, conducente a conocer el grado de relación entre percepción del color sensorial y grado de cocción de la carne (Apartado 4.1.1).

Una vez puesto a punto el sistema experimental, se realizaron ensayos a temperatura controlada y ensayos de cocción, orientados al estudio de los siguientes aspectos:

- Caracterización de diferentes propiedades físicos-químicas de la carne en ensayos de temperatura controlada.

Se obtuvo la cinética del cambio de color (Apartado 4.1.2), los cambios reológicos inducidos por el calor y la capacidad de retención de agua (Apartado 4.1.6) en diferentes ensayos a temperatura controlada.

- Caracterización de los grados de cocción para diferentes dimensiones de las piezas de carne (Apartado 4.1.3).

Estos ensayos se realizaron con el objetivo de relacionar el tiempo de cocinado con las pérdidas de peso, el color interno y las dimensiones de la carne para diferentes grados de cocción, con el fin de establecer los criterios que mejor caracterizaran los diferentes grados de cocción.

- Influencia de las condiciones de conservación de la carne propias del ámbito doméstico antes del cocinado en el comportamiento durante el cocinado y en la calidad final. (Apartados 4.1.4 y 4.1.5)

Se estudió el comportamiento de carne refrigerada durante distintos tiempos y carne sometida a un proceso de congelación y descongelación. La influencia de estas condiciones de conservación se ha estudiado tanto en el calentamiento en condiciones controladas como en la caracterización de los grados de cocinado. También se analizaron otras variables asociadas al cocinado doméstico, como la temperatura inicial de la carne, la temperatura de la sartén o el número de piezas de carne cocinadas simultáneamente.

- Modelado matemático del cocinado de carne de ternera por contacto en superficie caliente (Apartado 4.1.6).

En colaboración con el grupo de Mecánica Aplicada y Bioingeniería (AMB) del IA3 se ha desarrollado un modelo numérico de elementos finitos 3D para simular la cocción de carne de ternera por contacto con una superficie caliente. El modelo requirió de unos parámetros de entrada que se obtuvieron de forma experimental en los ensayos anteriormente citados realizados a temperatura controlada (propiedades reológicas, cinética de cambio de color y capacidad de retención de agua).

Los resultados sobre la caracterización del cocinado por contacto con una superficie caliente de carne de diferentes grosores se han utilizado para validar un modelo matemático y este trabajo se ha publicado en la revista *Journal of Food Engineering*, 298. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2021.110498, con el título “Development and validation of a computational model for steak double-sided pan cooking”.

Además, los resultados de los cambios de color de la carne se han utilizado para predecir el tiempo más adecuado para voltear la carne y conseguir un cocinado homogéneo mediante un modelo matemático y este trabajo se ha publicado en la revista *European Food Research and Technology*, 247. DOI: 10.1007/s00217-021-03821-y, bajo el título “Color changes in beef meat during pan cooking: kinetics, modeling and application to predict turn over time”.

1.3.2 Caracterización de panqueques por contacto con una superficie caliente.

De modo similar a lo descrito en el apartado 1.3.1 para la carne, durante los ensayos con panqueques se midieron diferentes parámetros tanto en continuo durante el cocinado, como tras el mismo. Se realizaron ensayos orientados al estudio de los siguientes aspectos:

- Evolución del color de la superficie de los panqueques durante el cocinado (Apartado 4.2.1)

Se determinó la cinética del cambio de color a partir de las coordenadas CIELab mediante análisis digital de imagen para un rango de temperaturas de 110 a 190 °C.

- Caracterización del proceso de cocción de panqueques y búsqueda criterios para dar la vuelta durante la cocción (Apartado 4.2.2).

Se realizó una caracterización del proceso de cocción de los panqueques, estudiando el color, la pérdida de peso y la temperatura superficial. Posteriormente se evaluaron diferentes posibles criterios para la acción de dar la vuelta al panqueque.

- Caracterización reológica de masas elaboradas con diferentes harinas y modelado matemático del cocinado de panqueque por contacto con una superficie caliente (Apartado 4.2.3).

Se seleccionaron diferentes harinas en función de su contenido en proteína, fibra y presencia o ausencia de gluten (trigo, espelta integral, avena integral, arroz integral, maíz, garbanzo y lenteja) y se analizó su comportamiento reológico en función de la temperatura.

También en colaboración con el grupo con el grupo de Mecánica Aplicada y Bioingeniería (AMB) del IA3 se ha desarrollado un modelo un modelo matemático que

se verificó y validó para panqueques elaborados con diferentes harinas. El modelo incorpora las propiedades reológicas para predecir la evolución de la pérdida de peso y de la temperatura durante el cocinado de los panqueques.

Los resultados obtenidos sobre la caracterización del cocinado de panqueques se han publicado en la revista *Journal of Food Engineering*, 291. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2020.110261, bajo el título “Modeling domestic pancake cooking incorporating the rheological properties”.

1.3.3 Caracterización de la pasta cocinada en medio acuoso

En primer lugar, se realizó una caracterización de los regímenes de ebullición en la placa de inducción al suministrar diferentes potencias durante el cocinado, obteniendo la velocidad de evaporación para cada potencia.

Posteriormente se analizó:

- La influencia de la potencia en la calidad de la pasta (Apartado 4.3.3).

Se estudió la influencia de la potencia como parámetro externo modificable en el cocinado en medio acuoso en pasta. Se analizó, para dos potencias (mínima potencia para apreciar hervor y máxima potencia suministrada por la placa de inducción) y para tres geometrías diferentes (espaguetis con dos grosores diferentes y macarrones), la evolución durante el cocinado de las propiedades de cocinado de la pasta (pérdidas por cocción, turbidez, grado de gelatinización, índice de hinchamiento, incremento de volumen e índice de absorción de agua) y también la evolución de los parámetros de textura (firmeza y pegajosidad). Además, se analizaron los parámetros de calidad de la pasta al tiempo óptimo de cocción.

- Influencia relación pasta:agua (Apartado 4.3.4).

Se investigó la influencia en las propiedades de cocinado de la pasta al emplear diferente relación pasta:agua con dos potencias de cocción para el espagueti grueso y el macarrón.

- Influencia de agitación durante el cocinado (Apartado 4.3.5)

Se estudió la influencia en las propiedades de cocinado de la pasta al cocinar la pasta con agitación o sin agitación utilizando dos potencias de cocción para las tres geometrías de pasta (espagueti fino, espagueti grueso y macarrón).

- Influencia de cocinar con diferente potencia al emplear pasta de diferente composición (4.3.6).

Se realizaron ensayos con diferentes tipos de pasta, en cuanto a su composición o ausencia de gluten (espagueti de trigo, trigo integral y sin gluten) y se evaluaron las propiedades de cocción y además se determinó el almidón resistente y digerible tras procesos de cocción a diferentes potencias.

1.3.4 Caracterización de los vegetales cocinados en medio acuoso

Se evaluó el efecto de la potencia de calentamiento sobre las propiedades físico-químicas y organolépticas (Apartado 4.4.1) y sobre la calidad nutricional (lixiviación, contenido en fenoles y capacidad antioxidante) de diferentes alimentos vegetales (Apartado 4.4.2). Los datos experimentales se ajustaron a ecuaciones cinéticas.

CAPÍTULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA



2.1 CAMBIOS EN LA CARNE DURANTE EL COCINADO

Cocinamos la carne por cuatro razones fundamentales: para que sea segura desde un punto de vista higiénico, más fácil de masticar y digerir y para que tenga un color y un sabor más atractivo (McGee, 2004). Se describen a continuación las transformaciones físicas y químicas de la carne durante la cocción, así como sus efectos.

2.1.1 Cambios en el color de la carne durante el cocinado

Los pigmentos hemo son los responsables del color de la carne. La mioglobina es el pigmento mayoritario en el músculo, mientras que la hemoglobina, el pigmento de la sangre, tiene una importancia menor en la carne. En el tejido desangrado correctamente, la mioglobina es responsable del 90% o más de la pigmentación muscular. Otros pigmentos menores presentes en el tejido muscular son las enzimas citocromo avinas y vitamina B12. El contenido de mioglobina varía considerablemente entre los tejidos musculares y está influenciado por factores como la especie, el tipo de músculo, la edad, el sexo, las condiciones de cría y la actividad física.

La mioglobina es una proteína globular formada por una única cadena polipeptídica de unos 17.800 KDa de peso molecular, unida a un grupo hemo. La estructura de la mioglobina (Figura II- 1) es muy compacta, con alrededor del 75 % de la cadena plegado en forma de 8 hélices α , con una estructura cuaternaria mantenida sobre todo por enlaces hidrofóbicos. Esta porción proteica de la molécula es una globulina. El componente cromóforo responsable de la absorción de la luz y del color es una porfirina conocida como hemo, que se compone de cuatro anillos de pirrol unidos entre sí y enlazados a un átomo central de hierro. El estado de oxidación de este átomo de hierro, el estado del núcleo de hematina, y el estado de la proteína globina son importantes para determinar el color de la carne. La porfirina hemo está presente dentro de un bolsillo hidrofóbico de la proteína globina y está unida a un residuo de histidina. El átomo de hierro situado en el centro posee seis sitios de coordinación, cuatro de los cuales están ocupados por los átomos de nitrógeno del anillo de tetrapirrol. El cuarto sitio de coordinación está ligado al residuo de histidina de la globina, dejando el sexto sitio disponible para formar un complejo con átomos electronegativos donados por varios ligandos, principalmente O₂, NO y CO (Mancini y Hunt, 2005; Varnam et al., 1995).

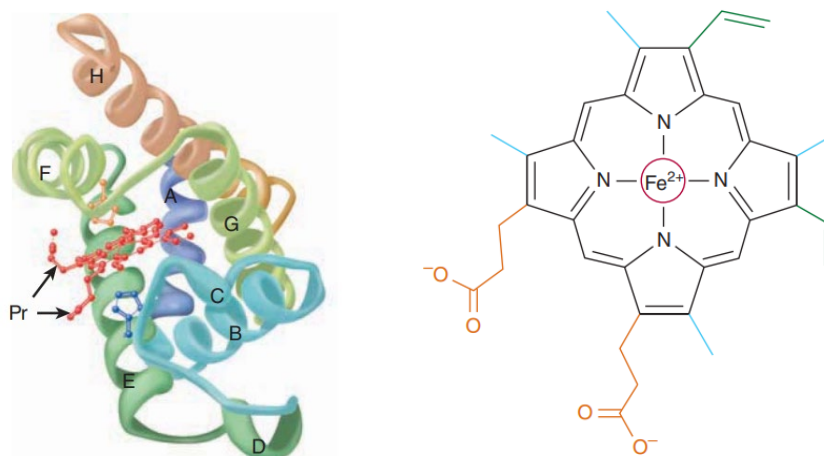


Figura II- 1. Representación tridimensional de la mioglobina (izquierda) con las 8 hélices (A-H) y el grupo prostético (Pr). Grupo hemo en forma de esquema bidimensional (derecha).

La mioglobina en la carne presenta tres formas principales, cada una de las cuales produce un color distintivo (Figura II- 2). En el tejido vivo, las formas fisiológicamente activas de oximioglobina y desoximioglobina se mantienen mediante la actividad de las enzimas metamioglobina reductasa. Estos procesos disminuyen post mortem y las condiciones de almacenamiento se vuelven determinantes para determinar la proporción de cada forma de mioglobina presente (King y Whyte, 2006; Warriss, 2000).

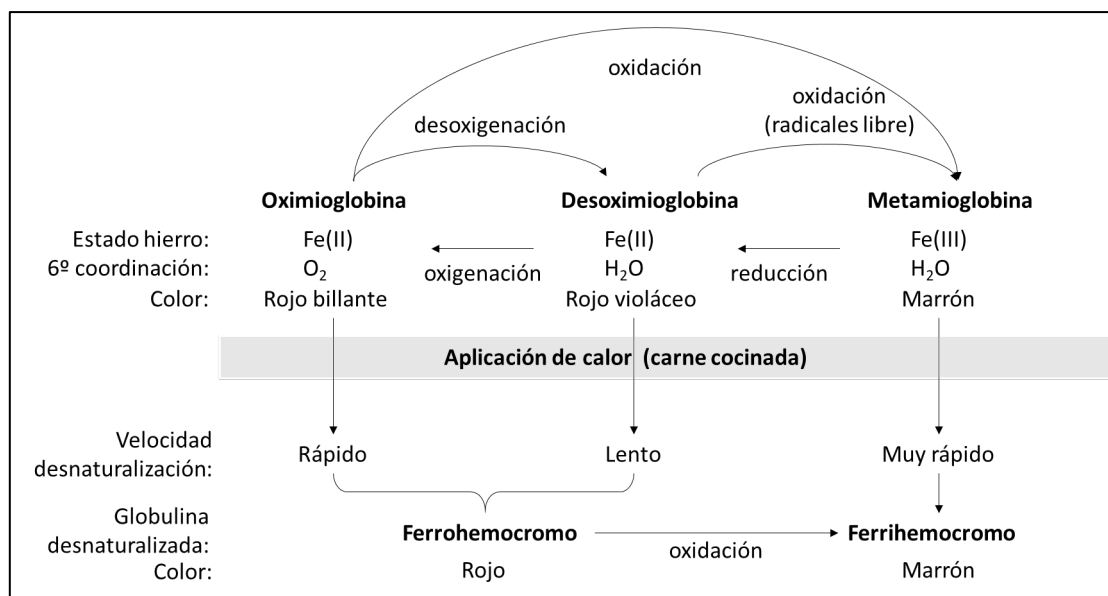


Figura II- 2. Reacciones de la mioglobina en la carne. Adaptado de King y Whyte (2006)

La desoximioglobina o mioglobina reducida ocurre cuando no hay ligando presente en el sexto sitio de coordinación y el hierro hemo es ferroso (Fe²⁺). Esto da como resultado el color rojo violáceo o rosa violáceo típicamente asociado con el

producto envasado al vacío o en la parte interna del músculo inmediatamente después del corte y forma cuando la presión parcial del oxígeno es muy baja. La oxigenación ocurre cuando la mioglobina se expone al oxígeno y se caracteriza por el desarrollo de un color rojo cereza brillante. No se produce ningún cambio en la valencia del hierro durante la oxigenación y el sexto sitio de coordinación ahora está ocupado por oxígeno. Además, la histidina distal interactúa con el oxígeno unido, alterando la estructura y estabilidad de la mioglobina. A medida que aumenta la exposición al oxígeno, la oximioglobina penetra más profundamente debajo de la superficie de la carne. La profundidad de la penetración del oxígeno y el grosor de la capa de oximioglobina dependen de la temperatura de la carne, la presión parcial del oxígeno, el pH y la competencia por el oxígeno por otros procesos respiratorios (Mancini y Hunt, 2005). El hierro ferroso se oxida a férrico por los radicales libres cuando la carne se almacena durante largos períodos de tiempo o si la superficie de exposición es grande, como en la carne picada, produciendo el pigmento marrón metamioglobina (mioglobina oxidada) (Varnam et al., 1995).

Como se aprecia en la Figura II- 2, la desoximioglobina, en presencia de oxígeno, se puede transformar en oxihemoglobina, de color rojo brillante típico de las carnes frescas, o en metamioglobina, que confiere un color marrón menos deseado (Hood y Riordan, 1973). En la carne fresca, la producción de sustancias reductoras naturales provoca la reducción continua de metamioglobina a oximioglobina, siempre que exista oxígeno en el medio (Cross et al., 1986). La oxidación de oximioglobina a metamioglobina se ve favorecida por las condiciones ácidas de la carne *post mortem* y la oxidación de desoximioglobina a metamioglobina está producida por enzimas captadoras de oxígeno del músculo y por el crecimiento microbiano (King y Whyte, 2006).

La mioglobina constituye alrededor del 0,5 % del peso de las carnes rojas y su respuesta frente al calor determina en gran medida el color de la carne cocinada (King y Whyte, 2006; Lytras et al., 1999). El color marrón de la carne cocinada está asociada a la desnaturalización de la mioglobina producida por el calor durante el cocinado. La desnaturalización térmica de la mioglobina es un proceso que no tiene lugar necesariamente a una temperatura concreta, sino que se produce en un intervalo estrecho de temperaturas (Bernofsky et al., 1959; Bowers et al., 1987). Lytras et al. (2000) estudiaron la cinética de la desnaturalización de la mioglobina en hamburguesas de carne de vacuno y de cordero cocinadas en un amplio rango de temperaturas internas y

observaron que la desnaturalización de la mioglobina sigue una cinética de primer orden. Esta desnaturalización comienza entre 55 °C y 65 °C en la carne, y se prolonga hasta los 75 °C u 80 °C (Hunt et al., 1999; Mancini y Hunt, 2005; Varnam et al., 1995). La velocidad de desnaturalización de la mioglobina disminuye con el aumento de la temperatura de la carne y es probable que esto esté relacionado con el aumento simultáneo del pH de la carne durante la cocción (Geileskey et al., 1998; King y Whyte, 2006).

Las tres formas de mioglobina difieren en su sensibilidad al calor. La desoximioglobina es la menos sensible a la desnaturalización por calor, mientras que la oximioglobina y la metamioglobina se comportan de modo similar (Hunt et al., 1999; Van Laack et al., 1996). La desnaturalización de la globina de la metamioglobina conduce a la formación de globina desnaturalizada conocida como ferrihemocromo, que es responsable del color pardo apagado en las carnes cocinadas. La desnaturalización de la globina en la oximioglobina y en la desoximioglobina da lugar a formación de ferrohemocromo de color rojo rosado. El ferrohemocromo se oxida fácilmente a ferrihemocromo por lo que la forma ferrihemocromo está presente en grandes cantidades en la carne cocinada (Suman et al., 2016; Varnam et al., 1995). La cocción adecuada de la carne produce un cambio de color a tonos blanquecinos, grises o marrones, según el tipo de músculo. El color final depende del grado de formación de ferrihemocromo, que a su vez es el producto de la proporcionalidad inicial de las mioglobinas y la concentración final de oximioglobina o desoximioglobina sin desnaturalizar (Van Laack et al., 1996; Varnam et al., 1995).

Los factores que influyen de forma más significativa en el color de la carne cocinada son el pH (Hughes et al., 2017; Suman et al., 2016), las condiciones de envasado (Stella et al., 2018) y el tipo de músculo (Suman et al., 2014).

La cantidad de ferrihemocromo que se forma a partir de la mioglobina durante la cocción se ve afectada por el pH inicial de la carne. Mientras que el músculo de los mamíferos tiene un pH de alrededor de 7, la carne fresca tiene un pH que varía de 5,4 a 5,6 (Varnam et al., 1995). En animales muy activos, estresados o expuestos al frío durante antes del sacrificio, el pH final de la carne es más alto (Warriss, 2000). Cuando el pH de la carne es alto, mayor de 6,0, la mioglobina es más estable y desnaturalización provocada por el calor en el cocinado es menor, por lo que se mantiene un color rosado en el interior

de la carne cocinada (Lien et al., 2002; Mancini et al., 2005; Suman et al., 2016). El color rosado asociado con la carne de alto pH que está correctamente cocinada, es más un problema para la calidad de los alimentos que para la seguridad alimentaria. Los consumidores pueden percibir que la carne de pH alto esta menos cocinada y continuarán cocinando a temperaturas más alta o durante más tiempo, con las consiguientes pérdidas de calidad (King y Whyte, 2006).

Otro aspecto importante relacionado con el color de la carne es el efecto de las condiciones de envasado. La carne envasada en atmósferas ricas en oxígeno tiene un aspecto de "bien hecha" a temperaturas más bajas (55 °C) que la que se almacena en ausencia de oxígeno (65-75 °C) (Clausen et al., 2009; Tørngren, 2003). Esto se debe al llamado "pardeamiento prematuro", que es la desnaturalización de las proteínas que se produce a temperaturas inferiores a las esperadas. La carne almacenada en ausencia de oxígeno es más rica en desoximioglobina, una molécula que es más resistente a la desnaturalización térmica que otras formas (oximioglobina y metamioglobina) (Lagerstedt et al., 2011). Este factor podría ser un problema en la seguridad alimentaria, ya que, en condiciones de fuerte oxigenación/oxidación, la carne puede parecer bien cocinada después de un tratamiento térmico insuficiente para inactivar los principales microorganismos patógenos.

La especie de animal, el sexo, la edad en el momento del sacrificio y la ubicación anatómica del músculo del que se obtiene la carne también pueden afectar el color final de la carne cocinada. Hasta cierto punto, esto se explica por las diferencias en el contenido de mioglobina. La carne de vaca, por ejemplo, contiene entre 4 y 10 mg de mioglobina/g de tejido húmedo, pero este valor podría llegar a 20 en animales más viejos. La carne de cerdo no contiene más de 3 mg de mioglobina/g de tejido húmedo. Los machos suelen tener concentraciones de mioglobina más altas que las hembras y los músculos con mayor carga de trabajo, como los músculos de las piernas, se oscurecen por un mayor contenido de mioglobina (King y Whyte, 2006). Los músculos individuales tienen ubicaciones anatómicas con funciones fisiológicas específicas, lo que resulta en diferencias en el metabolismo debido a sus tipos de fibras (Hunt y Hedrick, 1977). En consecuencia, cada músculo muestra una bioquímica post-mortem y una estabilidad de color únicas (Hood, 1980; Renner y Labas, 1987). Los músculos de color poco estable presentan una mayor tasa de consumo de oxígeno (O'Keeffe y Hood, 1982) y una menor tasa de reducción de

mioglobina (Ledward, 1985). Por el contrario, los músculos de color estable tienen mayores actividades reductoras (Reddy y Carpenter, 1991). Las investigaciones realizadas hasta la fecha han concluido que la estabilidad del color de la carne es un rasgo muy específico de cada músculo (King et al., 2011; McKenna et al., 2005; Seyfert et al., 2006).

Otro cambio que se produce durante el cocinado de la carne es el desarrollo de la opacidad. A medida que aumenta la temperatura de la carne, entre 45 °C y 67 °C, el músculo se vuelve progresivamente opaco, debido a la desnaturalización de las proteínas miosina y actina de la carne (Martens et al., 1982). Tornberg (2005) demostró que el aumento de la opacidad del color de la carne empieza aproximadamente a los 35 °C debido a la desnaturalización de la miosina. A los 40 °C, la mayoría de las moléculas de miosina originales han cambiado a monómeros con cabezas de miosina fusionadas. Por encima de 50 °C, las moléculas de miosina están completamente coaguladas y la carne se vuelve opaca. La carne cocinada tiene un color más brillante que las muestras crudas. Los aumentos de opacidad en la superficie de la carne causado por el tratamiento térmico pueden explicarse por pérdidas de agua que hacen que aumente la capacidad de reflejar la luz, es decir un color más brillante. En la carne muy hecha disminuye el brillo por la superficie, que se vuelve muy oscura, pero por el centro de la carne se encuentran colores más brillantes (Pathare y Roskilly, 2016).

El color de la carne está determinado en gran medida por la concentración y el estado químico (estado oxidativo y de oxigenación) de la mioglobina y se han realizado muchas investigaciones para optimizar el estado del pigmento y, por lo tanto, el color (Bekhit et al., 2013; Faustman y Cassens, 1990; Hunt y Hedrick, 1977). También se cree que la estructura del músculo y la cantidad de luz que dispersa contribuyen al color de la carne, aunque a esto se le ha prestado menos atención en los estudios del color de la carne (Hughes et al., 2017; Swatland et al., 1989).

La medición del color de la carne suele realizarse utilizando el sistema CIELab. Mediante este sistema se describen los colores visibles para el ojo humano y se caracterizan los colores según su tono, croma (posición a^* y b^* en el plano) y su luminosidad (L^*) correspondiente a la posición en una escala de blanco al negro (Figura II- 3). Por lo que la luminosidad es una contribución acromática al color percibido.

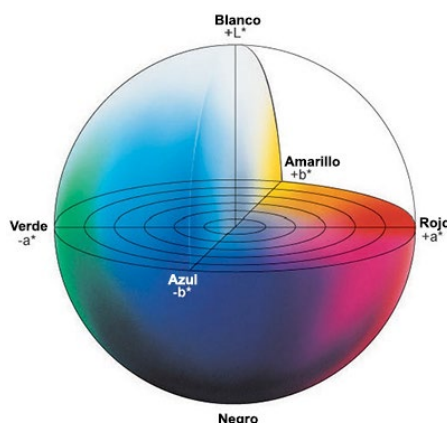


Figura II- 3. Representación tridimensional de los parámetros cromáticos CIELab.

Los componentes de tono y croma del color de la carne están dominados por la mioglobina, que cambia de color según su estado químico, y especialmente el grado de oxidación o reducción de la mioglobina. Debido a su papel dominante, las revisiones sobre el color de la carne se centran casi por completo en el papel de la bioquímica de la mioglobina en las variaciones del color de la carne (Faustman y Suman, 2017; Mancini, 2009; Suman et al., 2014; Suman y Joseph, 2013; Suman y Nair, 2017; Suman et al., 2016). Pero existen otros aspectos como la contribución acromática al color de la carne que se refleja en la variación de la luminosidad (L^*) (Purslow et al., 2020).

Cuando la luz incide sobre la superficie de un material no transparente que contiene pigmentos, parte puede reflejarse debido a la suavidad o rugosidad de la superficie. La humedad de la superficie puede reflejar o dispersar la luz incidente y la humedad de la superficie acumulada en superficies rugosas puede dar lugar a reflejos especulares. La cantidad de humedad en la superficie de la carne puede estar relacionada con el pH, la capacidad de retención de agua de la carne, y también se ve afectada por la temperatura y la humedad relativa ambiental y el tiempo transcurrido tras el corte. De la luz que pasa a la carne, parte es absorbida por los pigmentos y parte puede ser dispersada por partículas, estructuras, o interfaces entre las fibras musculares y las miofibrillas (que representan cambios abruptos en el índice de refracción). Si la dispersión cerca de la superficie es alta, gran parte de la luz se reflejará a través de la superficie como dispersión difusa y el material parecerá más claro/pálido. Si la dispersión es baja y la luz puede penetrar más profundamente en el material, la absorción será mayor y la carne se verá más oscura (Purslow et al., 2020).

Swatland estudió los posibles mecanismos que causan cambios en la palidez de la carne en una serie de investigaciones sobre la transmitancia, la dispersión óptica y la reflectividad de la carne y las fibras musculares (Swatland, 2002a, 2002b, 2004). Propuso que la palidez en la carne de cerdo puede estar causada por la refracción de la luz a través de las miofibrillas (Swatland, 2002a) y que la forma y el tipo de fibra muscular también pueden afectar las propiedades ópticas de la carne (Swatland, 2002b). Swatland (2012) opina que el fenómeno de la dispersión de la luz es extremadamente complejo y que se desconocen las causas microscópicas de la dispersión, pero estas dificultades no deberían disuadirnos de intentar comprender el mecanismo subyacente.

El color y la apariencia visual se utilizan como indicadores del grado de cocción de la carne cocinada (King y Whyte, 2006). La “Asociación Nacional de Ganaderos de Carne” en Estados Unidos dispone de la “Guía de color del filete de ternera: Grados de cocción” (NCBA, 1998). Esta guía (Figura II- 4) ilustra los cambios de color de carne desde "muy poco hecha" a "muy hecha" y la temperatura interna que corresponde desde 55°C a 82 °C. En otros países, como España, no existen equivalentes a la guía de colores (López Osornio et al., 2008). El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA, recomienda una temperatura de 62,8 °C para los filetes de ternera y un tiempo de reposo de tres minutos antes de comer, y cuando la carne está picada recomienda una temperatura de 71,1 °C. Sin embargo, las preferencias desde el punto de vista de la percepción sensorial del consumidor pueden no coincidir con estas temperaturas de seguridad (López Osornio et al., 2008). Además, diversos autores indican que el color interno de la carne no debe tomarse como indicador del punto óptimo de cocinado ya que, como se ha descrito anteriormente, depende de diferentes factores que pueden prolongar el color rojo de carne cruda en la carne cocinada o que pueden originar un pardeamiento prematuro (Berry y Bigner-George, 2000, 2001; Killinger et al., 2000; Suman et al., 2004).

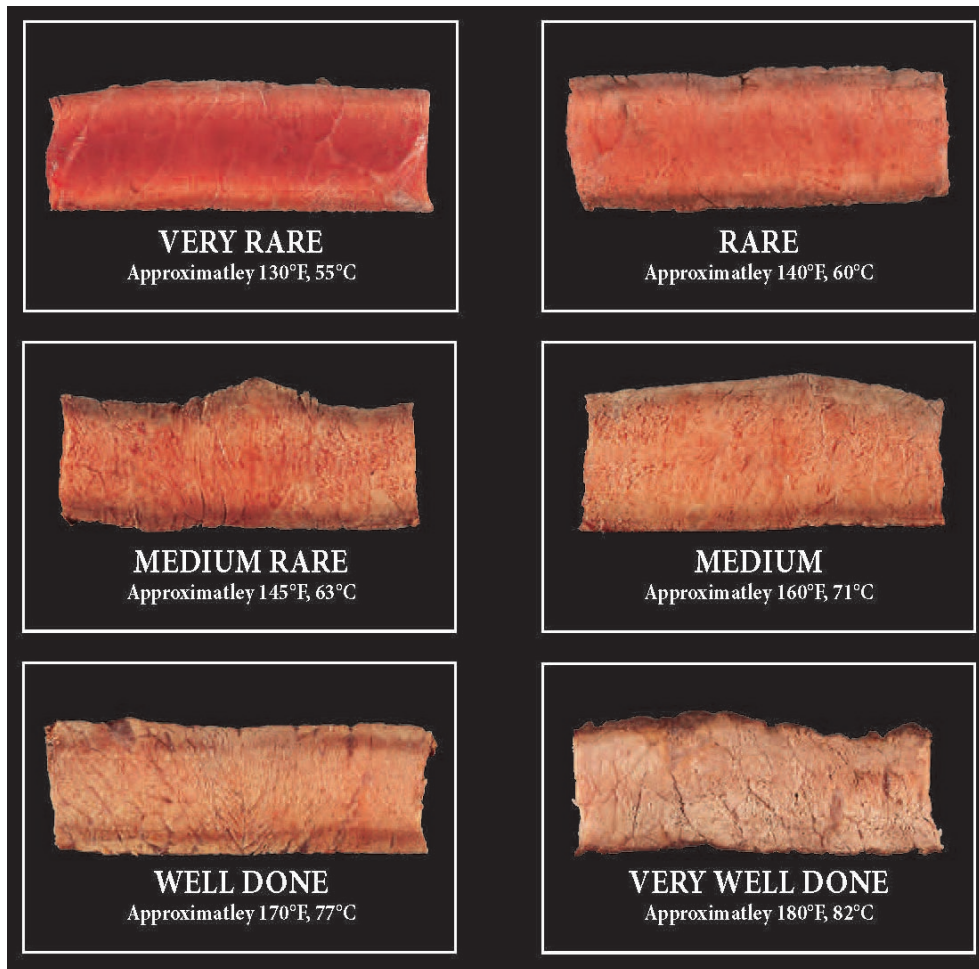


Figura II- 4. Guía de color del filete de ternera: Grados de cocción (NCBA, 1998)

El calentamiento de la carne a altas temperaturas da como resultado el desarrollo de la reacción de Maillard o pardeamiento no enzimático. La reacción de Maillard es una importante reacción química responsable del color marrón y el sabor de la carne cocinada (Chansataporn et al., 2019). El pardeamiento no enzimático también se puede producir como consecuencia de la caramelización de los azúcares, de la reacción entre quinonas con grupos amino o aminoácidos y de la interacción entre productos de la oxidación lipídica con proteínas. La química subyacente a la reacción de Maillard es muy compleja y abarca un conjunto de reacciones diversas. En la etapa final se produce la formación de polímeros y copolímeros nitrogenados marrones, conocidos como melanoidinas (Martins et al., 2000).

Los azúcares más importantes en el desarrollo de la reacción de Maillard son la glucosa y la fructosa, si bien la ribosa juega un papel más importante en la carne y productos cárnicos. El otro sustrato necesario para el desarrollo de la reacción de Maillard

son las proteínas, péptidos, aminoácidos y otras aminas. En las proteínas, el grupo reactivo es el ϵ -amino de los residuos de la lisina. Sin embargo, hasta ahora, el conocimiento de la reacción de Maillard en un sistema con muchos tipos de aminoácidos y azúcares reductores no se comprende claramente (Chansataporn et al., 2019).

La generación de la reacción de Maillard depende de la composición de los alimentos, así como de la temperatura y el tiempo de procesamiento. La temperatura óptima para que se produzca la reacción de Maillard se sitúa entre 145-160 °C, a las que la velocidad de reacción es muy elevada y los cambios de color son muy evidentes, pero se puede producir también incluso a temperatura ambiente. Los métodos de cocción con calor seco como la fritura (Chao et al., 2009) y el asado a la parrilla (Delgado-Andrade et al., 2010; Hull et al., 2012) aumentan la velocidad de la reacción de Maillard en 10 veces en comparación con la ebullición (Trevisan et al., 2016).

Trevisan et al. (2016) investigaron la influencia de los métodos de cocinado en la cocción de hamburguesa de carne de ternera. Vieron que los productos en la fase inicial de la reacción (medidos como furosina) predominaron en la carne asada y frita cocinada a una temperatura interna menor a 90 °C, mientras que los compuestos fluorescentes emergen a 90 °C y 100 °C, así como en la carne al horno a 180 °C y 240 °C. Los productos en una etapa avanzada de la reacción (medidos como carboximetilisina) se detectaron en niveles bajos cuando la carne se horneó a temperatura extrema (300 °C). Hervir la carne produjo niveles insignificantes de la reacción de Maillard. Por lo que vieron que, en general, los métodos de cocina doméstica conducen a una baja generación de productos de la reacción de Maillard en la carne de hamburguesa de ternera cocinada mediante diferentes técnicas culinarias comunes.

El grado de pardeamiento (generalmente determinado mediante medida de la absorbancia a 420 nm) se usa para evaluar hasta qué punto ha tenido lugar la reacción de Maillard en un alimento. No obstante, se ha afirmado que los compuestos causantes de esta medida se forman antes que los compuestos responsables de las tonalidades marronáceas (Martins et al., 2000). Hashiba (1982) concluyó que el dorado era directamente proporcional al poder reductor del azúcar y a las cantidades de glicina consumidas, comparando diferentes azúcares con un solo aminoácido. Sin embargo, Rizzi (1997) afirmó que muchos productos coloreados parecen ser productos de (retro)

aldolización / deshidratación de azúcares que pueden o no estar unidos a proteínas u otras fuentes de nitrógeno amínico.

2.1.2 Cambios en la textura de la carne durante el cocinado

2.1.2.1 Composición y estructura de la carne

En términos generales se considera que el músculo tiene una composición del 75% de agua, 20% de proteína, 3% de grasa y 2% de sustancias no proteicas solubles. Las proteínas se pueden dividir en tres grupos: proteínas miofibrilares, sarcoplásmicas y tejido conectivo. Las proteínas miofibrilares constituyen entre el 50 y el 55% del contenido total de proteínas, mientras que las proteínas sarcoplásmicas representan aproximadamente el 30-34%. El 10-15% restante de las proteínas son las proteínas del tejido conectivo (Tornberg, 2005).

El tejido conectivo en el músculo se distribuye entre en el endomisio, que rodea cada fibra de músculo, el perimisio, que rodea haces de fibras de músculo, y el epimisio, que rodea el músculo en su totalidad (Astruc, 2014). Este último apenas tiene repercusión en la textura percibida por los consumidores. El músculo también contiene tejido graso y en menor medida tejidos vasculares y nerviosos.

Las fibras musculares son células alargadas, multinucleadas y en forma de huso de aproximadamente 10 a 100 μm de diámetro y una longitud de hasta 30 cm. En todas las especies, el tamaño de la fibra aumenta con la edad animal y es un parámetro importante del crecimiento muscular postnatal. La membrana plasmática de fibra muscular se conoce como sarcolema (Listrat et al., 2016).

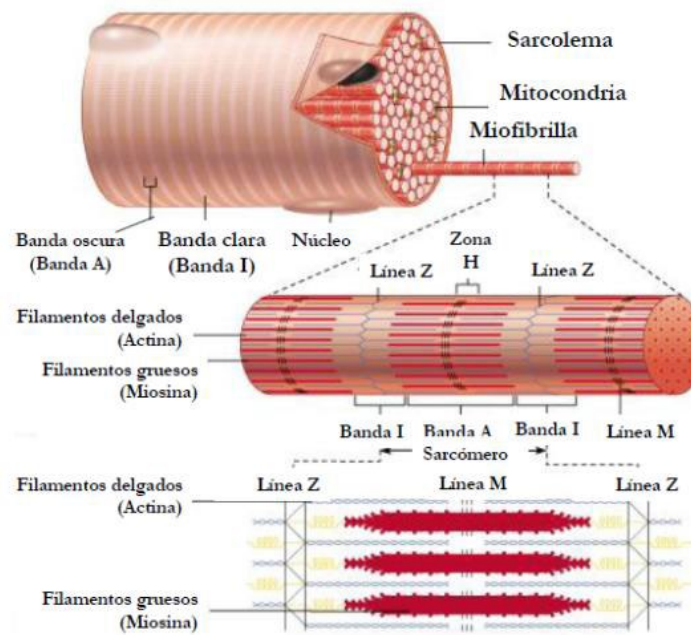


Figura II- 5. Organización general del músculo (Wilmore y Costill, 2010).

Las miofibrillas tienen un diámetro de aproximadamente 1 μm y consisten en pequeñas subunidades: los miofilamentos (Figura II- 5). Las secciones transversales longitudinales de las miofibrillas observadas por microscopía electrónica exhiben áreas oscuras alternas (bandas A) y claras (bandas I). Cada banda I está dividida en dos porciones por una línea Z. La unidad repetida que se encuentra entre dos líneas Z es el sarcómero, que es la unidad funcional contráctil de la miofibrilla (Figura II- 6). Se compone de al menos treinta proteínas diferentes, de las cuales las más abundantes son la miosina y la actina. Los miofilamentos delgados están formados principalmente por actina, troponinas T, I y C (que regulan la contracción muscular) y tropomiosina dispuesta de extremo a extremo a lo largo del filamento de actina. Los miofilamentos gruesos consisten principalmente en un ensamblaje de moléculas de miosina cuya actividad ATPasa cataliza la descomposición del trifosfato de adenosina (ATP) en el difosfato de adenosina (ADP) y proporciona la energía química requerida para la contracción muscular. El sarcoplasma, es decir, el citoplasma de las fibras musculares, contiene muchas proteínas solubles, incluidas las enzimas de la vía glicolítica y la mioglobina, que transporta oxígeno a las mitocondrias y tiñe las células de rojo. También contiene gránulos de glucógeno, que representan la reserva de energía local primaria de las células musculares, además de gotitas de lípidos (Listrat et al., 2016).

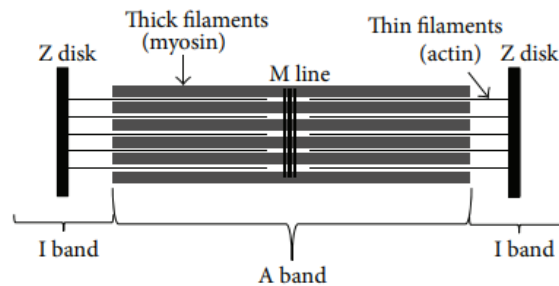
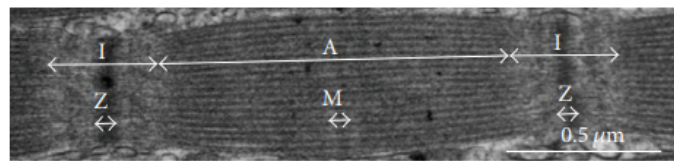


Figura II- 6. Secciones transversales longitudinales de las miofibrillas observadas por microscopía electrónica (arriba). Esquema de las miofibrillas (abajo) (Listrat et al., 2016).

El tejido conectivo intramuscular se compone principalmente de fibras de colágeno y elastina, rodeado por una matriz de proteoglicanos. Independientemente del tipo de colágeno, la unidad estructural básica del colágeno (tropocolágeno) es una estructura helicoidal que consiste en tres cadenas polipeptídicas enrolladas una, alrededor de la otra para formar una espiral. La proporción y el grado de reticulación de colágeno intramuscular dependen del tipo de músculo, la especie, el genotipo, la edad, el sexo y el nivel de ejercicio físico (Purslow, 2005).

Se han identificado varios tipos de colágeno I, III, IV, V, VI, VI, XII y XIV (Listrat et al., 2000; Listrat et al., 1999). Los tipos I y III son los principales tipos de colágeno formadores de fibra en endomisio, perimisio y epimisio, y el colágeno tipo IV es el principal componente no formador de fibras de la membrana basal que une la capa fibrosa (reticular) del endomisio a la membrana celular del músculo (sarcolema). En las especies de mamíferos, el tipo V es un componente en menor porcentaje del tejido conectivo intracelular (Purslow, 2005).

2.1.2.2 Cambios estructurales de la carne durante el cocinado

Durante el cocinado de la carne se producen cambios de conformación de las proteínas que se denominan genéricamente desnaturalización. La pérdida de terneza durante la cocción se ha relacionado, mediante el uso de calorimetría diferencial de barrido (DSC), con la desnaturalización térmica de las proteínas miofibrilares (Findlay y Stanley, 1984). En la Figura II- 7 se muestra una curva representativa de las transiciones

térmicas que se producen en el músculo. La zona A muestra su máximo entre 54 y 58 °C y corresponde a los cambios producidos en la miosina (Martens y Vold, 1976; Wright et al., 1977). La zona B se debe al colágeno (Martens y Vold, 1976; Stabursvik y Martens, 1980) y a las proteínas sarcoplásmicas (Wright et al., 1977) que ocurre entre 65 y 67 °C. Por último, la transición que ocurre entre 80 y 83 °C se ha atribuido a la actina (Wright et al., 1977).

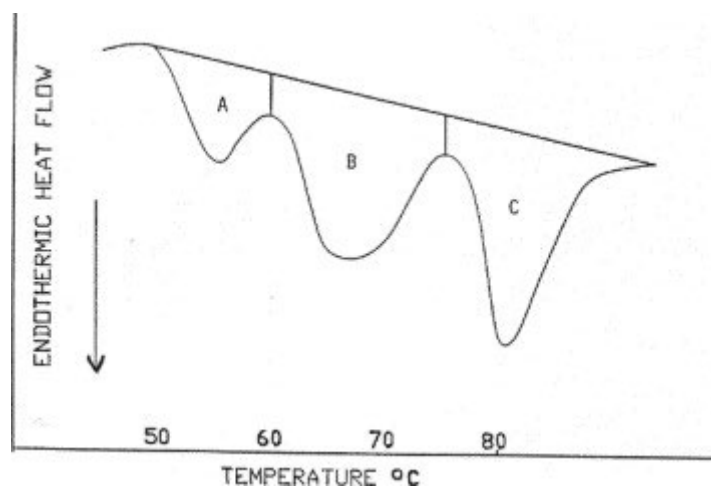


Figura II- 7. Curva térmica del músculo con tres zonas principales: A, subunidades de miosina; B, proteínas sarcoplásmicas y colágeno, y C, actina (Findlay et al., 1986).

La desnaturalización de las diferentes proteínas de la carne que se produce durante el calentamiento provoca cambios estructurales en la carne, como la destrucción de las membranas celulares, el acortamiento transversal y longitudinal de las fibras de la carne, la agregación y formación de gel de proteínas sarcoplásmicas y la retracción y la solubilización del tejido conectivo (Rowe, 1989).

A medida que aumenta la temperatura de la carne, la contracción de su volumen no es igual en todas las direcciones (Figura II- 8). Existe un mayor grado de contracción transversal a temperaturas entre 40 y 60 °C que de contracción a lo largo de la dirección de la fibra muscular. Sin embargo, entre 60 a 80 °C hay una mayor contracción longitudinal que transversal (Bouton et al., 1976). Además, la relación de contracción transversal a longitudinal en todo el rango de temperatura 40-80 °C está fuertemente influenciada por la longitud del sarcómero; para longitudes largas del sarcómero domina la contracción longitudinal y en las longitudes cortas del sarcómero la transversal (Purslow et al., 2016). A una temperatura más alta, de aproximadamente 121°C, puede haber un tercer proceso de contracción de la carne que es transversal al eje de la fibra

(Barbera y Tassone, 2006). Tornberg (2005) también ha documentado diferencias en la contracción transversal frente a la longitudinal de carne. Aunque diversos estudios con DSC correlacionan la desnaturalización de las principales proteínas (miosina, colágeno y actina) con los efectos de la cocción (Martens et al., 1982), la desnaturalización de cada uno de estos componentes no puede explicar adecuadamente las diferencias en la contracción transversal frente a la longitudinal a diversas temperaturas.

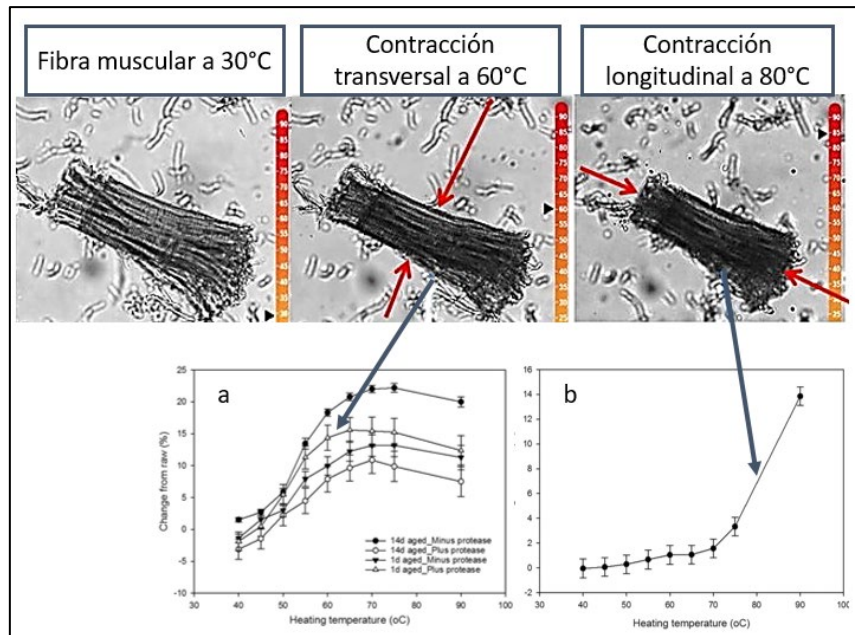


Figura II- 8. Fibras musculares que se contraen al calentarse debido a dos transiciones distintas (arriba). Cambios respecto a la fibra cruda en la anchura (a) y en la longitud (promedio de sarcómero y fragmento de fibra) (b) (Purslow et al., 2016).

2.1.2.3 Dureza de la carne

La dureza de la carne puede considerarse como la resistencia de la carne a las fuerzas de corte, compresión y tensión que actúan sobre las fibras, produciendo su deformación y fractura. La textura de la carne se puede evaluar mediante métodos sensoriales y por métodos instrumentales. La terneza sensorial generalmente se correlaciona adecuadamente con medidas instrumentales de textura (Font-I-Furnols y Guerrero, 2014).

El cocinado tiene un gran efecto sobre la dureza de la carne. El tejido conectivo influye en la dureza de la carne por su composición y estructura (Astruc, 2014), y el colágeno se considera generalmente el principal responsable de la fuerza de corte. Sin embargo, hay diferencias importantes entre la carne cruda y la carne cocida. La fuerza de

corte de la carne cruda está altamente correlacionada con su contenido de colágeno (Lepetit, 2008; Nishimura, 2015). En la carne cocida, el grado de correlación entre el contenido, la solubilidad térmica o el nivel de reticulación del colágeno y la fuerza de corte de la carne no está claro y varía según el tipo de músculo y las condiciones de cocción (Dubost et al., 2013; Ngapo et al., 2002). Durante el calentamiento, las fibras de colágeno se encogen y presurizan las fibras musculares en una magnitud que depende del grado de reticulación de colágeno y la organización del endomisio y el perimisio. El nivel de interacción entre el colágeno y las fibras musculares modula la desnaturalización térmica del colágeno, es decir, su gelatinización, y por lo tanto el desarrollo de la dureza de la carne durante la cocción (Lepetit, 2008). Además de su composición, la estructura del tejido conectivo, en particular su organización y el tamaño de los haces de perimisio, también desempeña un papel en el desarrollo de la dureza de la carne (Listrat et al., 2016; Sifre et al., 2005).

Generalmente, la dureza de la carne aumenta en dos fases distintas. Según Christensen et al. (2000) el primer aumento de dureza empieza entre 40 y 50 °C provocado por la contracción térmica del tejido conectivo y el segundo, entre 60 y 80 °C, debido a la desnaturalización de las proteínas miofibrilares. Entre 50 y 60 °C se produce una disminución de la dureza de la carne. Es probable que esta disminución se deba a un descenso de la resistencia a la rotura del tejido conjuntivo perimisial debido a la desnaturalización parcial y al encogimiento de las fibras de colágeno. Sin embargo, Tornberg (2005) sugiere que la razón de la dureza observada para la carne hasta aproximadamente 50 °C se basa en el hecho de que la tensión aplicada durante la masticación se reduce por el flujo viscoso en los canales llenos de líquido entre las fibras y los haces de fibras. Esta situación mejora de 50 a 65 °C por la formación de un gel de proteínas sarcoplásmicas agregadas que unen las fibras y los haces de fibras. El flujo viscoso se vuelve entonces más bajo a medida que aumenta la elasticidad de la carne en esa región de temperatura. El trozo de carne se fractura más fácilmente en la boca y se facilita la masticación y se mejora la terneza. Sin embargo, por encima de 65 °C la elasticidad actúa negativamente y altera la terneza. La contracción del tejido conectivo, que ocurre principalmente después de 65 °C, da lugar a un aumento en la elasticidad de la carne al formar un material mucho más denso en la región de temperatura de 65-80 °C y por lo tanto una carne más dura (Jowitt, 1979; Tornberg, 2005).

2.1.3 Cambios en el contenido en agua de la carne durante el cocinado

La pérdida por cocción es una combinación de materia líquida y sólidos que pierde la carne durante el cocinado (Aaslyng et al., 2003; Soyer et al., 2005). Se cuantifica como el porcentaje de diferencia de peso entre la carne cruda y la cocinada con respecto al peso de la carne cruda (Chiavaro et al., 2009). La pérdida de agua de la carne cruda entera se produce por evaporación de la superficie y como exudado cuando se corta un músculo. Este exudado, es una solución de proteínas sarcoplásmicas y se denomina pérdida por goteo. Este líquido se drena de la superficie cortada de la carne por gravedad si la viscosidad del exudado es lo suficientemente baja y las fuerzas capilares no lo retienen (Tornberg, 2005). Offer et al. (1989) concluyeron que esta pérdida por goteo surge predominantemente de los canales longitudinales a través de la carne entre los haces de fibras. Durante el cocinado, dependiendo de las condiciones de transferencia de calor y masa en la superficie, la materia líquida expulsada puede perderse mayoritariamente por evaporación o por goteo (Goñi y Salvadori, 2010).

Aproximadamente el 80% del agua en el músculo se mantiene dentro de las miofibrillas, en los espacios entre los filamentos gruesos y delgados (Offer et al., 1989). Cualquier modificación importante en la distribución del agua dentro de la estructura de la carne implica cambios en este espacio, por ejemplo, por reducción del volumen de las miofibrillas

El cocinado de la carne provoca cambios estructurales que disminuyen la capacidad de retención de agua de la carne. Algunos autores han analizado los cambios estructurales que ocurren durante la cocción relacionándolos con los cambios en el contenido en agua (Bejerholm et al., 2014; Offer, 1984; Pathare y Roskilly, 2016). En la Figura II- 9 se observa que las pérdidas por cocción comienzan a desarrollarse alrededor de los 40°C, aunque en carnes con pH bajo pueden comenzar alrededor de los 30 °C. Entre los 40 - 60 °C se produce la contracción transversal del eje de la fibra, se ensancha la fisura formada entre las fibras y el endomisio próximo. A 60-70 °C, la red de tejido conectivo y las fibras musculares se contraen longitudinalmente aumentando el grado de contracción con la temperatura. Esta contracción favorece la pérdida de agua que se produce al cocinar. Entonces se supone que el agua es expulsada por la presión ejercida

por el tejido conectivo que se contrae. A partir de 70 °C estas pérdidas por cocción disminuyen.

Las pérdidas por cocción dependen de la temperatura y la velocidad de calentamiento (Hearne et al., 1978; Palka y Daun, 1999). Las propiedades físicas de la carne y su calidad se ven afectadas en gran medida por la temperatura y el tiempo de cocción (Christensen et al., 2011). Li et al. (2013) observaron que con el aumento de la temperatura interna del músculo de la pechuga de pato las pérdidas por cocción aumentaron gradualmente. Otro factor que influye en las pérdidas por cocción es el método de cocinado utilizado. Dominguez et al. (2014) estudiaron el efecto de cuatro métodos de cocción diferentes (asar, asar a la parrilla, calentar con microondas y freír) sobre la pérdida de cocción de la carne de potro. La cocción con microondas resultó ser la que originaba una mayor pérdida por cocción, coincidiendo con los resultados de otros autores (Elshimi, 1992; Janicki y Appledorf, 1974; Nikmaram et al., 2011; Yarmand et al., 2013). El alto campo electromagnético, la alta potencia y el breve tiempo relacionado con el microondas dieron lugar a una rápida desnaturalización de las proteínas provocada por el choque térmico en las proteínas, produciendo una descomposición de la matriz, y, finalmente, la liberación de una gran cantidad de agua y grasa.

Métodos de cocción que requieren tiempo de cocción muy corto, como el cocinado en sartén, generan una menor pérdida por cocción que los métodos de cocción prolongados por ejemplo en horno convencionales para una misma temperatura central. La correlación entre el tiempo de cocción y la pérdida de cocción no es lineal, ya que la pérdida por cocción depende de una combinación de tiempo de cocción y velocidad de calentamiento. El cocinado a temperaturas bajas produce menores pérdidas por cocción que una cocción a temperaturas convencionales. Las pérdidas por cocción también difieren entre cortes. Los cortes con una gran cantidad de tejido conectivo tienen mayores pérdidas por cocción que los que tienen una menor cantidad de tejido conectivo. Cuanto mayor es la temperatura central, menor es la diferencia entre tipos de músculos. Además, a temperaturas más altas de 80 °C, son muy pequeñas las diferencias entre los métodos de cocción y cortes con diferentes cantidades de tejido conectivo (Bejerholm et al., 2014).

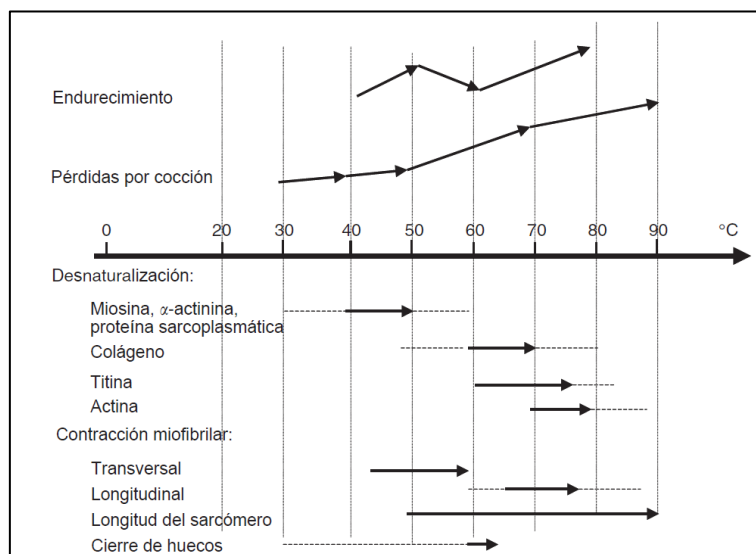


Figura II- 9. Cambios en carne durante el calentamiento (Bejerholm et al., 2014).

2.1.4 Estimación y predicción de los cambios en la carne durante el cocinado

La calidad de la carne al final del cocinado se controla principalmente por la persona que cocina mediante ajustes de las condiciones de cocción basados en la habilidad y experiencia. La modelización y la simulación numérica pueden jugar un papel importante en la asistencia al cocinado, proporcionando marcos adecuados y herramientas cuantitativas para predecir las relaciones entre las condiciones de cocinado y la evolución de las propiedades de la carne durante el cocinado. Para ello, es necesario comprender mejor en el contexto de la ingeniería alimentaria los mecanismos fundamentales de los fenómenos que ocurren durante el cocinado (Purlis et al., 2021).

Los parámetros de calidad final de la carne tras su cocinado se ven afectados por una compleja serie de componentes químicos, bioquímicos, y físicos que interactúan y determinan no solo la idoneidad para el consumo sino también la aceptabilidad del consumidor. Hay que conocer en profundidad estos factores intrínsecos y extrínsecos para garantizar una alta calidad de la carne, y una mayor seguridad para los consumidores. Entre las propiedades que caracterizan la calidad de la carne cocinada, la terneza se manifiesta como el factor más importante que rige la aceptabilidad del consumidor (Álvarez et al., 2019). Se conoce cómo cambia la textura de la carne con la temperatura (Barbanti y Pasquini, 2005; Wattanachant et al., 2005; Zell et al., 2010). Y, por lo tanto, se pueden cuantificar estos cambios mediante modelos cinéticos como el desarrollado por

Rabeller y Feyissa (2018b). Por otra parte, se han propuesto modelos basados en los fenómenos de transporte de calor y materia con los que se puede predecir la distribución de temperatura y humedad durante el proceso de cocinado de carne de cerdo (Feyissa et al., 2013; Van der Sman, 2007), de carne de vaca (Kondjoyan et al., 2013; Obuz et al., 2002) y de carne de ave (Chang et al., 1998; Van der Sman, 2013). A estos modelos se les puede acoplar la cinética que describe los cambios de textura durante el cocinado, tal y como realizaron Rabeller y Feyissa (2018b), implementando un modelo que permitió la predicción de la textura a diferentes tiempos de cocinado y en diferentes posiciones espaciales de la pieza de carne. En este sentido, el análisis del perfil de textura (TPA), que trata de simular el proceso de masticación, se utiliza a menudo para relacionar las mediciones mecánicas con la sensación subjetiva (atributos sensoriales); lo que hace que las características de la textura de los alimentos sean más predecibles (Chen y Opara, 2013). Otra propiedad mecánica importante es el módulo de Young. Utilizando esta propiedad mecánica, se han relacionado las condiciones de cocinado, con los fenómenos de transporte y la textura resultante (Sinha y Bhargav, 2020; Thussu y Datta, 2011; Thussu y Datta, 2012).

Las propiedades reológicas proporcionan una compresión más profunda de los mecanismos que rigen los cambios estructurales de la carne durante el cocinado. Al igual que las cinéticas, la evolución de las propiedades reológicas se pueden acoplar a modelos físicos que permiten predecir los cambios que experimenta la carne durante el cocinado. Así, Rabeller y Feyissa (2018a) desarrollaron un modelo que relaciona la textura, el módulo de almacenamiento y los fenómenos de transporte durante el horneado de pechuga de pollo. Feyissa et al. (2013) y Blikra et al. (2019) consideran los cambios que producen en el módulo elástico durante el horneado mediante un ajuste sigmoideal de los datos experimentales en función de la temperatura, para músculo de cerdo y de bacalao, respectivamente.

En muchos procesos que involucran alimentos sólidos y semisólidos, se producen cambios de volumen significativos y una gran deformación. Durante el cocinado de la carne, ésta pierde volumen por expulsión de líquidos y por los cambios estructurales producidos por la temperatura. Estos cambios a su vez provocan modificaciones en las propiedades de textura de la carne que se suman a los cambios inducidos por el calor en proteínas y grasas (Purslow et al., 2016). El cambio de volumen y la deformación, además

de los cambios en el contenido de humedad y el aumento de temperatura durante el cocinado, pueden generar variaciones en la porosidad y densidad (aparente) de la carne, modificando el transporte de humedad y grasa, y las propiedades mecánicas (Gibson y Ashby, 1997; Guessasma et al., 2011).

El cambio de volumen y la deformación implican la variación de la geometría de los alimentos y también el movimiento del sólido y, por lo tanto, deben tenerse en cuenta al modelar los procesos de transporte para un cálculo correcto de gradientes, flujos y valores promedio de las variables dependientes (Dhall y Datta, 2011). La contracción de la carne es uno de los cambios físicos más importantes que se producen durante los procesos de cocción (Du y Sun, 2005). Tiene importancia en el cálculo de los tiempos de cocción, debido a que los cambios de volumen y forma afectan a los gradientes de concentración y temperatura. Además, la contracción de la carne durante la cocción se considera como un parámetro de la calidad de la carne (Barbera y Tassone, 2006), pero resulta difícil medir las dimensiones de la carne cocida debido a la contracción multidimensional que produce irregularidades y deformaciones en la superficie (Zheng et al., 2007). La contracción se puede medir capturando los cambios en las dimensiones longitudinal y transversal, a través de medidas del perímetro, del área de la superficie, del volumen (Du y Sun, 2005; Moschetti et al., 2015; Zheng et al., 2007), así como en el diámetro de las fibras musculares individuales en las secciones de carne cocinada (Li et al., 2010). Clemente et al. (2009) compararon las mediciones de la contracción de la carne de cerdo durante el secado utilizando análisis digital de imágenes, calibre y desplazamiento de aceite, proponiendo el análisis de imágenes como el mejor método para estimar la contracción. Sin embargo, en el estudio de Vaskoska et al. (2020) se concluye que las pérdidas por cocción a diferentes temperaturas podían predecirse mejor mediante la medida del perímetro de la carne con un calibre.

Algunos autores han determinado que, la contracción durante el cocinado de la carne, se puede tener en cuenta considerando que el cambio en las dimensiones es proporcional al contenido de humedad (Clemente et al., 2009; Du y Sun, 2005; Katekawa y Silva, 2006; Wang et al., 2010) o considerando la contracción como el resultado integrado de la contracción dependiente de la temperatura y distribuida volumétricamente (Fowler y Bejan, 1991). Clemente et al. (2009) determinaron la evolución de la

contracción de la carne de cerdo durante el secado y obtuvieron una relación lineal entre el cambio de volumen y el contenido en humedad.

Durante el cocinado, las proteínas experimentan cambios estructurales que afectan a la calidad del producto cárnico final (Barbera y Tassone, 2006). Como se ha descrito anteriormente, las proteínas de la carne se desnaturalizan y provocan cambios estructurales como la contracción de las fibras musculares y del tejido conectivo durante el cocinado. Además, se produce la formación de poros más grandes en las partes más cercanas a la superficie, siendo más pequeños en las partes más cercanas al centro. Estos cambios en la porosidad conducen a un aumento de la permeabilidad del agua en las partes externas de la carne y, por tanto, al transporte de agua. Estos cambios en la microestructura con la diferenciación entre dos zonas, una cercana a la superficie y otra interna, con permeabilidades diferentes se ha tenido también en cuenta en algunos modelos (Feyissa et al., 2013).

Los fenómenos físicos en que se basa el proceso de cocinado de la carne, engloban el acoplamiento de la transmisión de calor y la transferencia de agua en un medio poroso susceptible de deformarse (Datta, 2007). El transporte de agua en el interior de la carne se ha abordado mediante dos enfoques: considerando que el movimiento del agua se produce solo por un mecanismo difusivo (Bisceglia et al., 2013; Chen et al., 1999; Obuz et al., 2002; Sargolzaei et al., 2011) o suponiendo que además el transporte de humedad puede explicarse por la teoría de Flory-Rehner (Ahmad et al., 2015; Feyissa et al., 2013; Nelson et al., 2020; Rabeler y Feyissa, 2018b; Van der Sman, 2007). Según esta segunda visión, los cambios estructurales afectan a la capacidad de retención de agua de la carne. La fuerza mecánica ejercida por la red de proteínas en contracción sobre el líquido intersticial, conduce a la expulsión del agua de la carne (Tornberg, 2005). Por lo tanto, el transporte de agua además de ser difusivo, se produce por el gradiente de presión generado en la solución acuosa que ocupa los huecos extracelulares debida a la contracción del tejido conectivo. En esta teoría se utiliza la ley de Darcy para asociar la presión hidráulica con el transporte de agua.

Sin embargo, aunque la contracción de las proteínas se tiene en cuenta a la hora de estimar la transferencia de agua dentro del alimento y por lo tanto en las pérdidas de peso durante el cocinado, pocos modelos consideran el cambio de volumen de la carne

durante el cocinado, con algunas excepciones (Blikra et al., 2019; Dhall y Datta, 2011; Feyissa et al., 2013). Dhall y Datta (2011) consideran la física de la deformación de la carne como si se tratase de un material hiperelástico, la acopla a los transportes de calor y materia, y lo implementa en el cocinado de hamburguesas.

El color y la jugosidad junto con la terneza son las principales propiedades sensoriales de la carne (Kondjoyan et al., 2014). La jugosidad está relacionada con la variación del contenido de agua en la carne durante su cocinado. La capacidad de retención de agua es el parámetro que se suele utilizar para cuantificar la resistencia de la carne a la salida de los jugos, durante el calentamiento. Se determina como el contenido en agua en el equilibrio para una temperatura dada por unidad de peso seco de producto. La disminución con la temperatura de la capacidad de retención de agua sigue una evolución sigmoidea (Goñi y Salvadori, 2010; Van der Sman, 2007). Varios estudios han determinado la cinética de las pérdidas por cocción de la carne durante el calentamiento (Goñi y Salvadori, 2010; Kondjoyan et al., 2013; Oillic et al., 2011). Kondjoyan et al. (2013) considera que el valor del contenido de agua de equilibrio no depende de la dimensión de la muestra y que la forma sigmoidea de la función se verifica sea cual sea el tipo de músculo. Oillic et al. (2011) afirma que el contenido en agua al final de la cocción es un valor fijo que no depende del contenido de agua de la muestra cruda ni de las dimensiones de la muestra. Este valor final del contenido en agua de la carne se puede relacionar directamente con la temperatura de cocción. A una temperatura dada, la cinética de las curvas del contenido de agua mostró patrones similares independientemente de la especie o del músculo.

El color de la carne depende de muchos factores, por lo que es cuestionado como parámetro para determinar el punto final de cocinado, siendo mejor parámetro la medida de la temperatura central de la carne para garantizarnos una seguridad microbiológica. Sin embargo, a nivel de implementación de un sistema de control doméstico es muy interesante conocer la evolución del color como complemento de la evolución de la temperatura. La variación del color con la temperatura y el tiempo no está claramente determinada. Hay algunos estudios como el de Goñi y Salvadori (2011) en carne de ternera que describe solamente la variación de la coordenada CIELab a^* mediante un modelo de primer orden con valor límite a tiempo infinito, o como el de Kondjoyan et al. (2014), también en carne de ternera, en el que se describe la evolución de la luminosidad,

L*, para temperaturas superiores a 66 °C, mediante una cinética de dos reacciones en serie de primer orden.

2.2 CAMBIOS EN LOS PANQUEQUES DURANTE EL COCINADO

Las masas batidas tipo panqueque son uno de los productos preferidos por los fabricantes de las placas de inducción para realizar los ensayos de optimización del diseño y de control de calidad (AEN/CT N 213 Electrodomésticos, 2014). Se trata de un producto que permite analizar la distribución de temperatura, uniformidad de cocción y otros aspectos críticos en el cocinado por contacto con superficie caliente utilizando sistemas de inducción (Sanz-Serrano et al., 2017).

Las masas batidas tipo panqueque se consideran productos de panadería y se basan en la mezcla de harina, huevos, grasa y azúcar (Hesso et al., 2015). La formulación es comparable a la de los bizcochos, pero el porcentaje de líquido es más elevado (Guibert-Martin et al., 2017). No obstante, al final del proceso de cocción, los valores de actividad de agua son similares a los de los productos tipo bizcocho. Cada uno de los ingredientes tiene un papel importante en las propiedades estructurales y reológicas, en el color y en su comportamiento durante el cocinado. Este tipo de productos presentan en crudo un comportamiento reológico viscoelástico, combinando las propiedades de un fluido y de un sólido (Hesso et al., 2015). La masa batida es tanto una emulsión compleja de grasa en agua con una fase discontinua de burbujas de aire y una fase continua de proteínas, azúcar, agua y grasa (Kocer et al., 2007).

El proceso de cocción es muy específico en este tipo de productos, ya que es mucho más breve que la de horneado de otras masas batidas. Durante la cocción, la viscosidad de las masas disminuye hasta un valor mínimo cuando la temperatura alcanza 60°C aproximadamente, incrementándose posteriormente de forma rápida. Durante la cocción se produce la gelatinización del almidón, la desnaturalización y coagulación proteica y la evaporación de agua. Todos estos procesos conducen a modificaciones en las propiedades colorimétricas, estructurales y reológicas de las masas.

2.2.1 Cambios en el color de los panqueques durante el cocinado

El aspecto y color de la superficie del alimento es el primer parámetro de calidad valorado por los consumidores y es determinante para la aceptación del producto, ya que se relaciona con el sabor y con el nivel de satisfacción posterior (Pedreschi et al., 2006b). Durante el cocinado de masas derivadas de cereales, la formación de tonos tostados y

dorados durante el cocinado está asociado principalmente a la formación de compuestos derivados de la reacción de Maillard y de la caramelización (Zhang et al., 2016).

La reacción de Maillard tiene lugar por la interacción entre los azúcares reductores y los aminoácidos, las proteínas y/u otros compuestos nitrogenados especialmente cuando se someten a altas temperaturas. Sin embargo, la caramelización describe un grupo complejo de reacciones que ocurren debido al calentamiento directo de los carbohidratos, en particular la sacarosa, y azúcares reductores (Fennema, 1992). Los ingredientes de alimentos horneados como pan, pasteles y galletas, es decir, harinas, azúcares, huevos, leche, etc., aportan los reactivos de estas reacciones químicas que se ven aceleradas por un nivel de humedad medio-bajo y una temperatura alta obtenida en la superficie del producto durante el horneado (Purlis, 2010).

La reacción de Maillard toma el nombre del químico francés Louis-Camille Maillard quien inicialmente describió la reacción entre aminoácidos y azúcares a altas temperaturas (Maillard, 1912). Posteriormente, Hodge (1953) fue capaz de proponer un esquema de las reacciones implicadas, dividiendo la reacción de Maillard en las siguientes etapas (Figura II- 10):

- Etapa inicial: productos incoloros, sin absorción en el ultravioleta (sobre 280 nm).
 - a) Reacción A: Condensación azúcar-amino
 - b) Reacción B: Reordenamiento Amadori
- Etapa intermedia: productos incoloros o amarillos, con fuerte absorción en ultravioleta.
 - c) Reacción C: Deshidratación azúcar
 - d) Reacción D: Fragmentación del azúcar
 - e) Reacción E: Degradación de aminoácidos (degradación Strecker)
- Etapa final: productos muy coloreados.
 - f) Reacción F: Condensación Aldólica
 - g) Reacción G: Condensación Aldehído-Amino y formación de compuestos nitrogenados heterocíclicos.

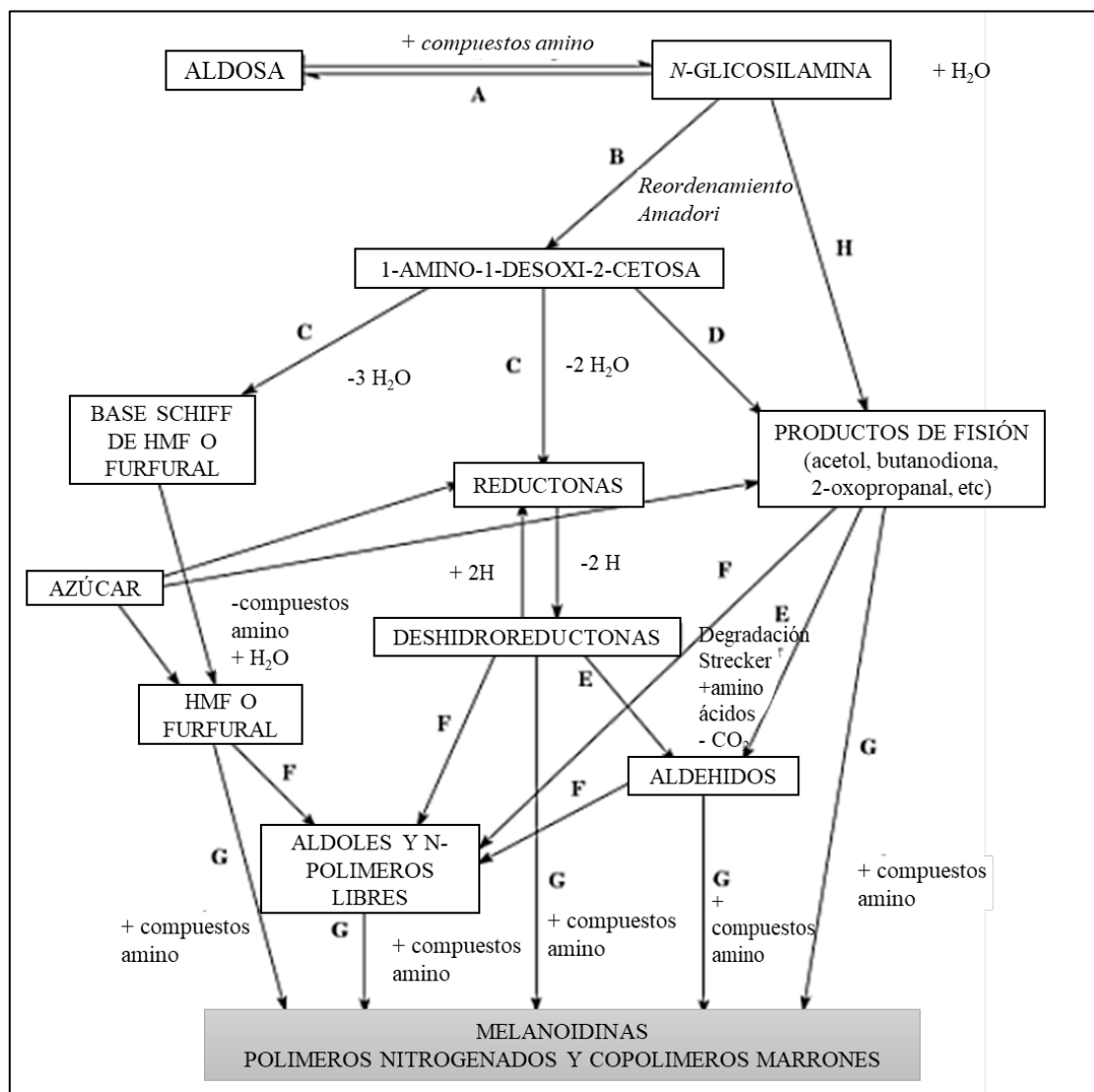


Figura II- 10. Esquema reacción de Maillard. Adaptado de Nursten (2005).

La reacción de Maillard aún no se ha dilucidado por completo, aunque en los últimos años diferentes estudios han tratado de completar el esquema propuesto por Hodge y se han establecido nuevas rutas de generación de compuestos (Martins et al., 2000)

La etapa inicial comienza con una condensación entre un grupo amino y un azúcar reductor (aldosa y cetosa), formándose una N-glicosilamina en el caso de un azúcar de aldosa que se reorganiza en el llamado producto Amadori (1-amino-1-desoxi-2-cetosa) o producto de Heyns si el azúcar reductor es una cetosa. Los productos iniciales que se forman tras las primeras reacciones de glucosilación entre aminoácidos y azúcares reductores son incoloros. Sin embargo, conforme la reacción progresa se forman uniones

no saturadas y aumenta la concentración de grupos carbonilo libres, dando lugar a productos cada vez más reductores.

La etapa intermedia comienza con el producto Amadori/Heyns, que conduce a productos de fragmentación del azúcar y liberación del grupo amino. El producto Amadori posteriormente se degrada en diferentes compuestos dependiendo del pH del sistema. A pH medio-bajo (4-7), se produce hidroximetilfurfural o furfural (cuando están involucradas hexosas o pentosas, respectivamente) que se forman a través de la enolización. Son compuestos altamente reactivos que participan en reacciones posteriores (es decir, condensación y polimerización) que conducen a la formación de melanoidinas y otros polímeros pardos y sustancias aromáticas (Martins et al., 2000). Otras vías de reacción ($\text{pH} > 7$) implican la deshidratación y fragmentación del azúcar, la degradación de aminoácidos (degradación de Strecker) y finalmente, la polimerización y formación de melanoidinas. Una reacción importante es la degradación de aminoácidos por parte de Strecker por compuestos dicarbonílicos. El aminoácido se descarboxila y desamina para dar lugar a un aldehído, mientras que el dicarbonilo se convierte en una α -aminocetona o aminoalcohol. Estas reacciones conducen a la formación de muchas de las moléculas activas en olor, que caracterizan los aromas de los alimentos cocinados, como furanos, pirazinas, pirroles, oxazoles, tiazol (cuando hay cisteína involucrada) y otros compuestos heterocíclicos (Fay y Brevard, 2005). Los productos de reacción correspondientes (intermedios) incluyen reductonas, productos de fisión (acetol, piruvaldehído y diacetilo), aldehídos, aldoles y polímeros libres de nitrógeno y aldiminas (Hodge, 1953).

La etapa final conduce a todo tipo de reacciones de deshidratación, fragmentación, ciclación y polimerización en las que vuelven a participar los grupos amino. Las reacciones de deshidratación y degradación contribuyen en su conjunto a la formación de polímeros de condensación de pigmentación oscura que se denominan melanoidinas. Su formación discurre a través de complejos mecanismos que implican la polimerización de muchos de los compuestos formados durante la etapa inicial e intermedia de la reacción de Maillard. En las etapas finales de la reacción de Maillard continúan produciéndose reacciones de polimerización y se generan productos cada vez más oscuros y menos solubles en agua. Este proceso se acelera en presencia de grupos amino libre, oxígeno y temperaturas elevadas.

Adicionalmente, existen una serie de factores que modulan la intensidad con la que la reacción tiene lugar y que pueden determinar su viabilidad o inhibición en unas condiciones dadas (Martins et al., 2000):

- Alcalinidad del medio: La reacción es más rápida en medios alcalinos, siendo el valor de pH = 10 donde la velocidad es máxima.
- Temperatura: La velocidad de la reacción aumenta con la temperatura. No obstante, dada su baja energía de activación, la reacción de Maillard tiene lugar incluso en condiciones de refrigeración, aunque de forma mucho más lenta.
- Actividad de agua: Es un factor capaz de inhibir la reacción tanto por exceso como por defecto. Dado que uno de los productos de la reacción es el agua, si la actividad de agua es elevada ($>0,9$) la reacción se inhibe. Si, por el contrario, la actividad de agua es demasiado baja ($<0,6$) la movilidad de los reactivos se ve comprometida y la reacción no tiene lugar.
- Tipo de aminoácido: Los aminoácidos con cadenas de mayor tamaño y conteniendo más de un grupo amino son los más reactivos.
- Tipo de azúcar reductor: La naturaleza de los azúcares reductores influye sobre la velocidad de la reacción de Maillard. Atendiendo al número de carbonos en la cadena del azúcar reductor, las pentosas son más reactivas que hexosas. Análogamente, los monosacáridos también son más reactivos que los disacáridos. Por otro lado, aquellos azúcares reductores con un grupo aldehído en su molécula (aldosas) son más reactivos que aquellos que contienen un grupo cetona (cetosas).
- Metales como el cobre y el hierro actúan como catalizadores.

La caramelización también es un grupo complejo de reacciones y se produce mediante el calentamiento intenso, es decir, a temperaturas superiores de 120 °C, de los carbohidratos reductores en ausencia de compuestos que contengan nitrógeno. Durante el horneado, el almidón y la sacarosa pueden hidrolizarse dando lugar a azúcares reductores que pueden participar en ambas reacciones de pardeamiento, por lo que la reacción de Maillard y la caramelización pueden tener lugar simultáneamente (Capuano et al., 2008).

Como se ha citado anteriormente, en la última etapa de la reacción de Maillard, diversas reacciones químicas como la condensación, polimerización, degradación, ciclación, etc. dan lugar a melanoidinas, que son polímeros heterogéneos. La estructura

unitaria no está especificada, aunque se postulan varias teorías sobre la estructura química de las melanoidinas (Wang et al., 2011). Una de ellas considera que el esqueleto de melanoidina se forma a partir de productos de degradación del azúcar ramificados con compuestos amino. Sin embargo, estas estructuras de la columna vertebral en sí mismas no muestran color y en consecuencia, las melanoidinas deberían tener estructuras parciales de varios cromóforos (Murata, 2021). La segunda teoría es que las melanoidinas son polímeros de pigmentos de bajo peso molecular formados a partir de azúcares y aminoácidos. Recientemente, Kanzler y Haase (2020) propusieron que las melanoidinas se forman por intermedios heterocíclicos de la reacción de Maillard a través de la reacción aldólica y la adición de Michael. Las melanoidinas no muestran un máximo de absorción específico en la región de la luz visible (380-780 nm), lo que sugiere que las melanoidinas tienen cromóforos mixtos o diversos (Murata, 2021).

Teniendo en cuenta que los pigmentos de bajo peso molecular podrían ser precursores de las melanoidinas, la investigación de los pigmentos de bajo peso molecular es importante para comprender el pardeamiento o pigmentación por la reacción de Maillard. Los pigmentos de bajo peso molecular que tienen menos de 1000-2000 kDa de peso molecular podrían identificarse químicamente, mientras que las melanoidinas apenas se identifican debido a su heterogeneidad y dificultades para identificar la estructura de la unidad (Echavarria et al., 2012).

2.2.1.1 Medida del color

La formación de color puede determinarse mediante diferentes técnicas experimentales, que se pueden dividir en dos categorías principales: técnicas directas e indirectas. El primer grupo incluye métodos químicos que tienen como objetivo medir la concentración de los productos de las reacciones de pardeamiento o, alternativamente, el consumo de reactivos. Por el contrario, el enfoque indirecto se centra en registrar la variación de color producida por la reacción de Maillard y la caramelización, y por lo tanto, puede reflejar mejor las modificaciones inducidas por las aplicaciones tecnológicas.

Las técnicas directas, basadas en análisis químicos, están destinadas principalmente a medir la concentración de HMF y furfurales en productos durante el horneado. El procedimiento general consiste en la extracción y posterior cuantificación por HPLC-UV realizando la detección UV a 280 o 284 nm (Ameur et al., 2007; Ameur

et al., 2006; Ramirez-Jimenez et al., 2000). Se utiliza un protocolo similar para la determinación de furosina, compuesto formado en las primeras etapas de la reacción de Maillard (Ramirez-Jimenez et al., 2000). La cinética de desarrollo del pardeamiento también puede estudiarse midiendo el consumo de reactivos. En este sentido, Ameer et al. (2007) cuantificó la degradación de azúcares en el horneado de galletas con un método de detección HPLC-RI (índice de refracción), después de una extracción de agua-etanol.

Las técnicas indirectas se basan en un enfoque instrumental o sensorial. Debido a la necesidad de disponer de datos objetivos en la medida del color, se han desarrollado métodos e instrumentos capaces de dar valores de color normalizados, tales como colorímetros y espectrofotómetros que muestran los resultados en diferentes espacios de color. Una sensación de color, por compleja que sea, puede describirse mediante el uso de tres componentes de color por los ojos. Estos componentes, que se denominan valores triestímulos, son producidos por los tres tipos de conos (células fotorreceptoras de color) en función del grado en que se estimula cada uno. Un espacio de color es la representación matemática para asociar a cada color los valores triestímulo que se perciben por la vista. En la medición del color de los alimentos, el espacio de color $L^* a^* b^*$ es el más utilizado debido a la distribución uniforme de los colores, y porque es perceptualmente uniforme, es decir, la distancia euclidiana entre dos colores diferentes corresponde aproximadamente a la diferencia de color percibido por el ojo humano (Leon et al., 2006; Yam y Papadakis, 2004).

La masa cruda presenta valores de luminosidad, L^* , entre 80 y 95 (Purlis y Salvadori, 2009; Ramirez-Jimenez et al., 2000; Shibukawa et al., 1989), aunque puede presentar valores menores en función de los ingredientes presentes, ya que por ejemplo el huevo y azúcar inducen masas más oscuras (Broyart et al., 1998). Durante el horneado se producen dos etapas. La primera etapa se caracteriza por una iluminación de la superficie durante los primeros minutos. Este fenómeno ha sido descrito por algunos autores. Shibukawa et al. (1989) sugirió que el secado de la superficie era el responsable. Broyart et al. (1998) también observaron este fenómeno y sugirieron que era debido a la expansión inicial del producto. Este motivo fue propuesto posteriormente por Purlis y Salvadori (2007, 2009). Antes de hornear, es decir, después de la preparación de la masa, la superficie de la masa es irregular, pero después de unos minutos de calentamiento, se vuelve considerablemente lisa debido al aumento de volumen. Este cambio en la textura

de la superficie puede ser la razón del incremento en la luminosidad, ya que una superficie regular lisa puede reflejar más cantidad de luz que una irregular arrugada. En este sentido, esta primera etapa está relacionada con el método utilizado para medir el desarrollo del pardeamiento. Ciertamente, la reflectancia o técnicas visuales como el colorímetro o el sistema de visión por computadora pueden detectar este cambio (físico) en contraste con los métodos químicos.

Existen unos requisitos mínimos para el inicio de la formación de color durante la cocción de productos de panadería. En general, el pardeamiento se detecta cuando la actividad de agua disminuye a 0,4-0,7 y la temperatura supera los 105-120 °C. En estas condiciones, solo la superficie puede mostrar un cambio significativo de color durante el horneado. De hecho, en el pan, sólo se detecta hidroximetilfurfural en la corteza (Capuano et al., 2008; Ramirez-Jimenez et al., 2000). La temperatura en las regiones internas (o miga) no supera los 100 °C y el contenido de agua permanece casi constante hasta el final del horneado. En productos tipo galletas puede ser diferente cuando la temperatura del horno es alta, debido al bajo espesor del producto (Ameur et al., 2007; Sablani et al., 1998). A medida que avanza el horneado, la temperatura aumenta y la actividad del agua disminuye en la superficie del producto y, por lo tanto, el desarrollo del pardeamiento se acelera y conduce a la formación y acumulación de compuestos de color que se manifieste en un descenso de la luminosidad (Figura II- 11). La formulación del producto también es un factor crítico para el desarrollo del pardeamiento. En los productos con azúcar, la cantidad y el tipo de azúcar son las principales variables que afectan la formación del color. En general, la formación de hidroximetilfurfural aumenta con el contenido de azúcares, pero dependiendo de las condiciones de horneado, la degradación de los azúcares se produce de diferentes formas (Purlis, 2010).

Cuando la temperatura es muy alta y la actividad de agua es baja, se produce caramelización produciendo más cambios de color además de los productos de reacción de Maillard, lo que conlleva a una apariencia quemada con una baja luminosidad en el producto. Algunos autores sugirieron valores de cambios de color total (ΔE^*) entre 50 y 60 como condición inaceptable para el consumo de pan (Ahrne et al., 2007; Zandoni et al., 1995).

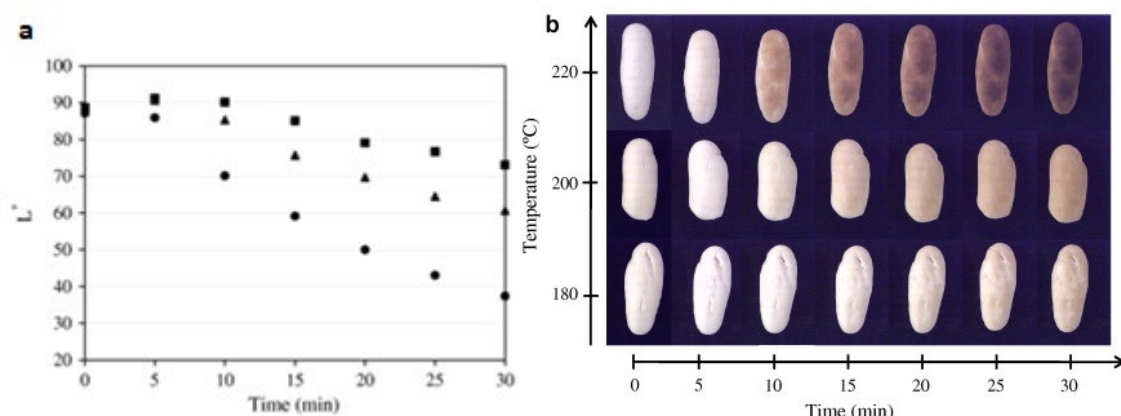


Figura II- 11. a) Variación de la luminosidad de la superficie del pan durante la cocción a 180 °C (cuadrados), 200 °C (triángulos) y 220 °C (círculos). (b) Galería de imágenes de muestras correspondientes a (a) (Purlis y Salvadori, 2009).

Los valores de luminosidad o la concentración de hidroximetilfurfural pueden ser muy variables en función del tipo de producto y las condiciones de horneado o cocción, por lo que no se pueden marcar valores estándar.

Un índice común para seguir el desarrollo del pardeamiento es el uso del valor de la luminosidad L^* . Normalmente, el valor L^* (tomado como valor medio del área analizada) decrece en el tiempo a medida que aumenta el pardeamiento de las muestras (Ameur et al., 2007; Bayindirli et al., 1995; Quevedo et al., 2016). Sin embargo, el valor L^* no parece ser un buen índice para representar el pardeamiento, especialmente cuando la reacción de pardeamiento ocurre en un alimento sólido donde los colores se distribuyen de manera no homogénea en la superficie del alimento. Este es el caso, por ejemplo, del pardeamiento no enzimático de las patatas fritas (Pedreschi et al., 2004) o de las galletas (Gokmen et al., 2008), donde las zonas más oscuras dentro de la misma área analizada aparecen más pronunciadas que otras debido a la variabilidad de la reacción (Quevedo et al., 2018).

Sin embargo, también presenta gran interés considerar en el pardeamiento la evolución de las coordenadas a^* y b^* . En el estudio de Gokmen et al. (2008) observaron similitudes entre los cambios en la acrilamida y la coordenada CIELab a^* durante el calentamiento, lo que reveló que el color puede ser un indicador fiable de los niveles de acrilamida en los alimentos procesados térmicamente. Por otra parte, Silva et al. (2022) observaron que es posible definir el punto óptimo de horneado cuando la coordenada b^* de la corteza alcanza el valor al que tiende asintóticamente.

2.2.2 Cambio en el contenido en agua durante el cocinado de los panqueques

Durante el proceso de cocinado de una masa, todos los cambios físicos y estructurales que determinan la calidad del producto final, están relacionado con los fenómenos internos de transferencia de calor y masa (Lostie et al., 2002b). Durante el cocinado, una masa batida se trasforma en un sólido fino y blando debido a una serie de reacciones físicas, químicas y bioquímicas. Los factores clave que afectan estas reacciones son el transporte, el estado y la distribución del agua (Huang et al., 2021). El movimiento del agua puede verse limitado por la gelatinización del almidón y puede afectar a la expansión de las células de gas durante el horneado. Además, juega un papel importante en la textura y valor nutricional del producto (Zhang et al., 2017).

En productos como el pan los mecanismos de transporte de agua durante el horneo se han estudiado ampliamente (Ureta et al., 2019; Zhang et al., 2017). El transporte de agua se produce de varias formas: evaporación del agua superficial, difusión del agua líquida desde el núcleo a la superficie, transporte difusivo del vapor (evaporación-condensación-difusión) y el transporte convectivo a través de la fase gaseosa (Ley de Darcy). Si prevalece sólo la permeación (ley de Darcy), cuanto mayor es la porosidad de la superficie superior de la masa, menor y más lenta es la pérdida de agua; de hecho, cuanto mayor es la porosidad, más gruesa es la corteza. Esto limita la velocidad a la que el calor penetra en las capas superiores hasta el frente de vaporización y ralentiza la pérdida de agua. Al principio del horneo cuando la temperatura de ebullición no se ha alcanzado uniformemente a través de la miga, la evaporación-condensación-difusión ocurre al mismo tiempo que la permeación. El flujo de agua por evaporación-condensación-difusión se orienta hacia el núcleo de la masa, se acelera el engrosamiento de la corteza y se ralentiza la pérdida de agua. Cuando mayor es la porosidad de la miga debajo de la corteza, mayor es el flujo por evaporación-condensación-difusión y menor es la pérdida de agua (Zhang et al., 2017).

Sin embargo, existen pocos estudios donde se determine la pérdida de agua en productos elaborados a partir de masas batidas. Así Lostie et al. (2002b) dividieron el proceso de horneado del bizcocho en dos etapas: el período de calentamiento, cuando el agua migra desde el núcleo a la superficie por difusión en la fase líquida; y el período de la formación de la corteza y la miga, cuando el vapor de agua migra por convección.

Según Lostie et al. (2002b), durante el periodo de calentamiento, el primer calor recibido en la superficie por convección y por radiación provoca la evaporación superficial del agua y el calentamiento de la masa. Los gradientes internos de temperatura y el contenido de agua aseguran, la transferencia difusiva de calor desde la superficie al núcleo de la masa, y la transferencia difusiva de agua líquida desde el núcleo a la superficie. Además, el gradiente de temperatura induce, a través de la presión de saturación del vapor de agua, un gradiente de presión parcial de vapor de agua que produce un flujo difusivo de vapor desde la superficie hacia el núcleo. Como la temperatura en el núcleo es más baja, se puede suponer que el vapor de agua condensa y humedece el núcleo del bizcocho. El flujo difusivo de agua líquida desde el núcleo es menor que el flujo de agua evaporada en la superficie, por lo que la capa superficial del bizcocho se seca alcanzando un contenido en agua muy bajo y en consecuencia la transferencia de calor desde la superficie queda limitada por la conducción de calor a través de la capa seca superficial. La vaporización del agua en el interior provoca una sobrepresión debido a la resistencia mecánica a la deformación de la matriz. Esta sobrepresión genera un flujo gaseoso convectivo dirigido desde la zona de máxima sobrepresión hacia la superficie del bizcocho. A medida que se va secando el bizcocho el mecanismo de transferencia de agua pasa de un estado de transferencia difusiva en fase líquida a un estado de transferencia difusiva y convectiva en fase gaseosa. Al final de este periodo se comienza a formar una capa seca superficial, esta capa constituye una barrera importante para la transferencia de calor, así como para la transferencia de agua.

El periodo de formación de la corteza y la miga se produce cuando se pueden distinguir dos zonas dentro del bizcocho. La costra es una capa seca superficial que produce gradientes de temperatura y presión total. Se produce la apertura y endurecimiento de la matriz de la masa, que conlleva un aumento de la permeabilidad y se produce una deshidratación total de la corteza, que implica una presión parcial de vapor de agua muy baja, se puede suponer que dentro de la corteza predomina la transferencia convectiva de la fase gaseosa debido a la sobrepresión en el núcleo del bizcocho. La miga se mantiene húmeda, siendo la temperatura, el contenido de agua y la presión de la fase gaseosa total uniformes, de modo que los mecanismos de transferencia internos no son relevantes. La costra constituye una barrera a la transferencia de calor del exterior al

interior que hace que la transferencia de calor de la corteza aumente más rápidamente que su resistencia a la transferencia de la masa (Lostie et al., 2002b).

Huang et al. (2021) llevó a cabo un estudio en el que analizaba la pérdida de agua en diferentes bizcochos. Demostró con el análisis de la formación de la costra y de la estructura de la miga durante el horneado, la máxima evaporación se produce en la superficie del producto. La superficie se seca y se vuelve lisa en los primeros minutos de cocinado. La costra actúa como una barrera para la pérdida de peso, sin embargo, la formación de costras se acompaña de la apertura de la fisura superficial, lo que favorece la evaporación del agua. En cuanto a la miga, los poros circulares en la miga de bizcocho actúan como canales de escape de agua durante el horneado lo que da como resultado un menor contenido de agua y una mayor pérdida de agua. Cuanto menor área de poros más difícil se forman los canales de escape del agua en la miga, lo que resulta en una menor pérdida de agua durante el horneado.

Durante el proceso de horneado, las moléculas de agua pueden quedar atrapadas en los productos de panadería por el almidón, el gluten y otros componentes (Najafabadi et al., 2014). En realidad, en un bizcocho, la harina juega un papel fundamental debido a su componente principal: el almidón. Durante el horneado, los gránulos de almidón absorben mayores cantidades de agua que a temperatura ambiente. En exceso de agua, los gránulos de almidón se hinchan y gelatinizan, lo que se acompaña de la absorción de agua y luego forman la estructura de la miga final (Donovan, 1977; Godefroidt et al., 2019; Wilderjans et al., 2013).

2.2.3 Cambio de las propiedades reológicas durante el cocinado de panqueques

La determinación de las propiedades reológicas de las masas batidas es importante porque tiene un impacto en el volumen y la textura del producto final (Figura II- 12) (Yazici y Ozer, 2021).

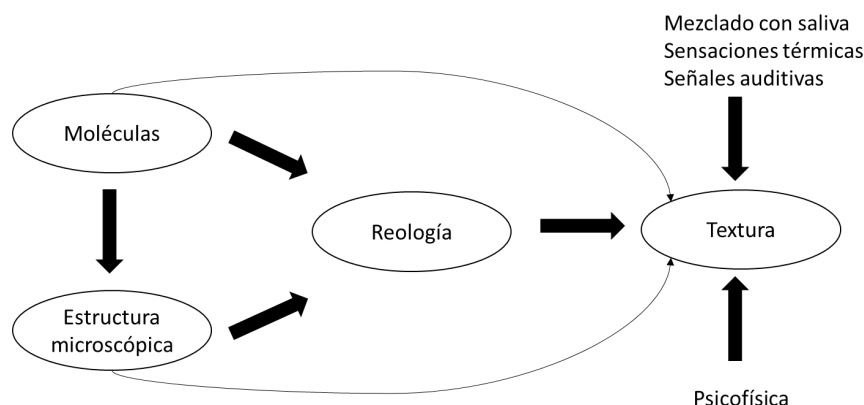


Figura II- 12. *Interrelación entre reología, estructura y textura de los alimentos (Borwankar, 1992).*

La masa de un producto amiláceo se considera como un sistema complejo e inestable que se somete a una modificación continua en sus características físicas a través de las acciones de fuerzas físicas, químicas y biológicas (Rao y Rao, 1993). Puede describirse como un material viscoelástico, en el cual un alto grado de viscosidad y plasticidad se combina con una considerable elasticidad (Wang y Sun, 2002). Estructuralmente se considera que la masa de trigo es un sistema complejo donde la interacción entre las proteínas hidratadas, la matriz de almidón y las interacciones almidón-proteína influyen en sus propiedades viscoelásticas. La base molecular para las interacciones almidón-almidón son las fuerzas de Van der Waals y los puentes de hidrógeno. Las proteínas de gluten interactúan por enlaces disulfuro, puentes de hidrógeno, entrecruzamientos e interacciones hidrofóbicas para formar una red continua, que es la base para el desarrollo y retención de gas en la masa (Tronsmo et al., 2003).

La viscosidad de la masa batida es un parámetro que determina el volumen final del producto. En presencia de masas con una menor viscosidad, no se retiene el dióxido de carbono, y el vapor de agua producido podría no quedar atrapado en el producto durante el cocinado, dando como resultado productos con un volumen bajo. Una elevada viscosidad ayuda a retener más burbujas de aire en la masa y retrasa el aumento de burbujas en la superficie. Además, el gradiente de velocidad en la masa durante el cocinado induce una corriente de convección en un momento dado dependiendo de su viscosidad, a menor viscosidad de la masa, da como resultado un mayor flujo de convección. De hecho, hay una óptima viscosidad de masa batida para alcanzar un producto final con un alto volumen. Si la viscosidad de la masa es demasiado baja, la masa no podrá retener las burbujas de aire en el interior. Aunque, si la viscosidad de la

masa es alta, puede mantener las burbujas en el interior, pero la expansión de la masa se restringe debido a esta alta viscosidad.

Existen varios estudios en la literatura en que las propiedades reológicas de las masas batidas están correlacionadas con la calidad del producto final (Chin y Martin, 2014; Lakshminarayan et al., 2006; Ronda et al., 2011; Sahin, 2008). Masas con una baja gravedad específica y alta viscosidad se obtienen productos con un elevado volumen. El aumento en la densidad de la masa (disminuye el contenido en aire incorporado en la masa) disminuye el módulo de pérdida y el de almacenamiento de las masas batidas y también el volumen específico del producto.

2.2.3.1 Tipo de masas y relación con la microestructura

Las masas batidas comprenden una amplia gama de productos de panadería, que difieren mucho tanto de sus ingredientes como de sus proporciones y en los métodos de procesamiento usados para fabricarlos. La Figura II- 13 se muestran algunos tipos de productos de masas batidas donde se hace una distinción entre las masas que son tipo emulsión que contienen altos niveles de grasa y las masas que son tipo espuma que contienen pequeños niveles de grasa. La viscosidad difiere según el tipo de masa batida, la viscosidad inicial de las masas tipo espuma es más alta que la de las masas tipo emulsión, debido a la gran cantidad de celdas de aire incorporadas que se suma a la presencia de tensioactivos. Durante la cocción, la viscosidad de la masa disminuye tanto en las masas tipo emulsión como en las masas tipo espuma, aunque difiere entre ellas debido a la falta de grasa sólida en las masas tipo espuma. Después se distingue entre masas que tiene altos niveles de azúcar o bajos niveles de azúcar y finalmente, entre las que incorporan el huevo entero o sólo la clara. En consecuencia, la microestructura de los productos finales de las masas batidas es de gran complejidad y varía mucho entre los diferentes tipos de productos (Sahin, 2008).

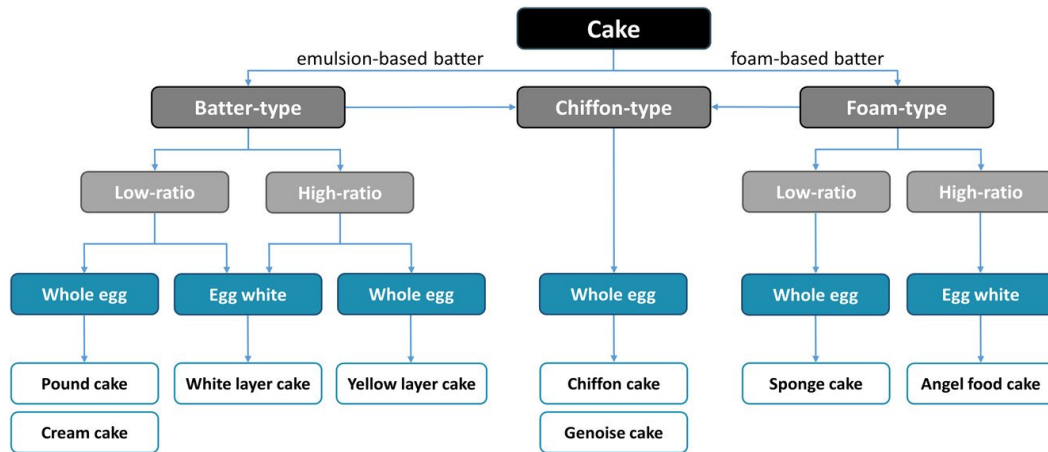


Figura II- 13. Clasificación de los tipos de pasteles hechos a base de espumas o emulsión (Godefroidt et al., 2019).

Durante el mezclado de la masa se produce la incorporación de aire en la masa que da lugar a la formación de una espuma en la masa. La incorporación de aire depende tanto del proceso de aireación (velocidad de batido) como de las propiedades físico-químicas de la masa (viscosidad y tensión superficial), que vienen determinadas por la formulación (Allais et al., 2006). La eficiencia de la retención de aire es inversamente proporcional al tamaño de las burbujas y a la viscosidad de la masa (Ronda et al., 2011). Las masas más viscosas ayudan a retener el aire y evitan que las burbujas suban a la superficie del producto, lo que da resultado una estructura desigual en la miga. Durante el horneado, la emulsión aireada se convierte en un semisólido poroso principalmente debido a la gelatinización del almidón y la coagulación de proteínas (Sahin, 2008). Ambas transiciones de fase dependen claramente de las fuentes de almidón y proteínas. Cuando se produce un aumento en las temperaturas de gelatinización del almidón y coagulación de las proteínas, el cambio de la masa de una emulsión fluida y aireada a una estructura sólida y porosa ocurre más tarde, lo que permite que el bizcocho aumente su volumen durante más tiempo. El contenido de aire incorporado también está correlacionado con el tiempo de mezcla para las masas batidas (Chesterton et al., 2011). Generalmente, el contenido de aire aumenta bruscamente y luego cae a un estado estable con una mezcla continua. La aireación juega un papel importante en la reología de las masas, el estudio de Allais et al. (2006) muestra una fuerte dependencia entre el contenido de aire con la reología de un tipo de masa batida, donde el valor n (índice del valor de potencia) aumentó con la fracción de volumen de aire en la masa.

La estructura aireada final de la masa depende principalmente de la incorporación de aire, pero también de la retención de éste. La estabilidad de la espuma depende de tres procesos principales: el flujo de líquido motivado por la gravedad, la coalescencia de las burbujas y la desproporción de las burbujas motivada por la difusión del gas de las burbujas más pequeñas a las más grandes (Sagis et al., 2001). En fluidos de viscosidad alta, como masas batidas, el mecanismo de desestabilización más importante es la coalescencia de burbujas (Allais et al., 2006). La alta viscosidad que aporta la mezcla de agua y harina favorece la retención física de las pequeñas burbujas inicialmente incorporadas al batido durante el mezclado (Sahi y Alava, 2003). Además, como el tiempo entre la aireación de la masa y el horneado es corto (varios minutos), los efectos de los procesos de desestabilización son limitados.

La incorporación de aire disminuye la densidad y modifica la viscosidad de la masa. El contenido de aire generalmente se expresa usando la densidad, La densidad es un indicador de la cantidad de aire incorporada a la masa y del potencial de desarrollo durante el horneado. Si la densidad es demasiado baja, las burbujas de aire están en su máxima expansión y tienen un bajo potencial de expansión, lo que significa que puede abrirse en la superficie y la estructura del producto puede colapsar. Por otro lado, si la densidad es demasiado alta, entonces no se incorpora suficiente aire a la masa y el producto no se desarrollará lo suficiente durante el horneado (Allais et al., 2006). El contenido de aire adecuado depende del tipo de producto.

Dependiendo del método de mezcla, se podrán dar diferentes interfaces aire-agua, aceite-agua y aire-aceite en la masa (Wilderjans et al., 2013). La grasa puede añadirse antes o después del proceso de aireación produciendo un fluido de tres fases de burbujas de aire, materia insoluble en suspensión y una emulsión de grasa-agua como fase continua (Chesterton et al., 2011).

Durante la primera etapa del horneado, como resultado del aumento de la temperatura, crecen las burbujas de gas debido a la expansión del aire, la evaporación del agua, la disminución de la solubilidad del gas en la fase acuosa y la formación de dióxido de carbono por la fermentación (Delcour y Hoseney, 2010; Willhoft, 1973). En las masas batidas que son tipo espuma y no tienen grasas, el aumento de volumen que se produce durante el horneado es suficiente y está determinado principalmente por la incorporación

de aire durante el mezclado y por la producción de vapor durante horneado (Conforti, 2014; Delcour y Hoskeney, 2010). Sin embargo, cuando se introduce una fuente de grasa, como puede ser la yema de huevo, la espuma es menos estable y la incorporación de aire durante el mezclado es algo restringida. Por lo que, en estos casos, para asegurar un aumento de volumen durante la cocción de masas que contienen grasa, se recomienda el uso de levaduras (Pycarelle et al., 2019).

2.2.3.2 Comportamiento reológico de las masas

Dentro de la clasificación de los alimentos por su comportamiento reológico (Figura II- 14), las masas batidas se pueden considerar como fluidos viscoelásticos similares a un gel en reposo pero fluidas cuando se someten a un esfuerzo (Smith y Tschoegl, 1970).

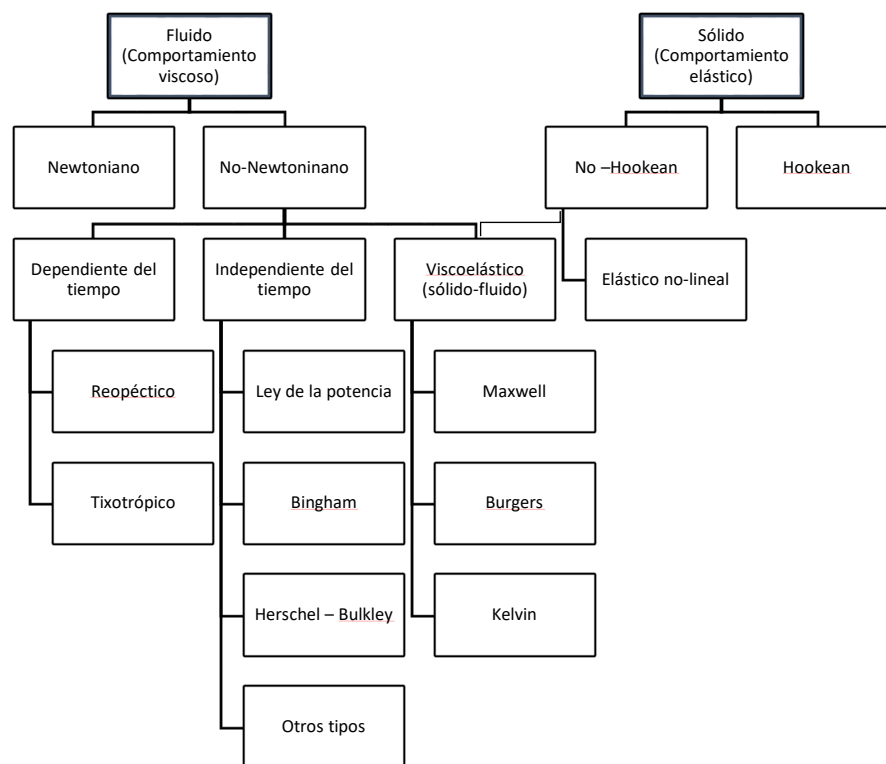


Figura II- 14. Clasificación del comportamiento reológico.

Entre los numerosos modelos reológicos existentes para describir el comportamiento de los fluidos (Tabla II- 1), la Ley general de la potencia se usa comúnmente para describir la variación del esfuerzo con la velocidad de deformación en las masas batidas.

Tabla II- 1. Modelos reológicos para describir el comportamiento de los fluidos independientes del tiempo (Steffe, 1996).

Model (Source)	Equation *
Casson (Casson, 1959)	$\sigma^{0.5} = (\sigma_o)^{0.5} + K_1(\dot{\gamma})^{0.5}$
Modified Casson (Mizrahi and Berk, 1972)	$\sigma^{0.5} = (\sigma_o)^{0.5} + K_1(\dot{\gamma})^{n_1}$
Ellis (Ellis, 1927)	$\dot{\gamma} = K_1\sigma + K_2(\sigma)^{n_1}$
Generalized Herschel-Bulkley (Ofoli et al., 1987)	$\sigma^{n_1} = (\sigma_o)^{n_1} + K_1(\dot{\gamma})^{n_2}$
Vocadlo (Parzonka and Vocadlo, 1968)	$\sigma = \left((\sigma_o)^{1/n_1} + K_1\dot{\gamma} \right)^{n_1}$
Power Series (Whorlow, 1992)	$\dot{\gamma} = K_1\sigma + K_2(\sigma)^3 + K_3(\sigma)^5 \dots$ $\sigma = K_1\dot{\gamma} + K_2(\dot{\gamma})^3 + K_3(\dot{\gamma})^5 \dots$
Carreau (Carreau, 1968)	$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_o - \eta_{\infty}) \left[1 + (K_1\dot{\gamma})^2 \right]^{(n-1)/2}$
Cross (Cross, 1965)	$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_o - \eta_{\infty}}{1 + K_1(\dot{\gamma})^n}$
Van Wazer (Van Wazer, 1963)	$\eta = \frac{\eta_o - \eta_{\infty}}{1 + K_1\dot{\gamma} + K_2(\dot{\gamma})^{n_1}} + \eta_{\infty}$
Powell-Eyring (Powell and Eyring, 1944)	$\sigma = K_1\dot{\gamma} + \left(\frac{1}{K_2} \right) \sinh^{-1}(K_3\dot{\gamma})$
Reiner-Philippoff (Philippoff, 1935)	$\sigma = \left(\eta_{\infty} + \frac{\eta_o - \eta_{\infty}}{1 + ((\sigma)^2/K_1)} \right) \dot{\gamma}$

Las variables que afectan a la viscosidad de un fluido son la presión, la concentración de sólidos, la temperatura, la velocidad de deformación y el tiempo. La viscosidad generalmente aumenta con el aumento de presión y con el aumento de la concentración de sólidos en el producto. La viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura. La viscosidad aparente de un líquido no newtoniano es función de la velocidad de deformación $\eta_{app}=f(\dot{\gamma})$. La Figura II- 15 muestra la presentación clásica de los diferentes fluidos en función de la velocidad de deformación.

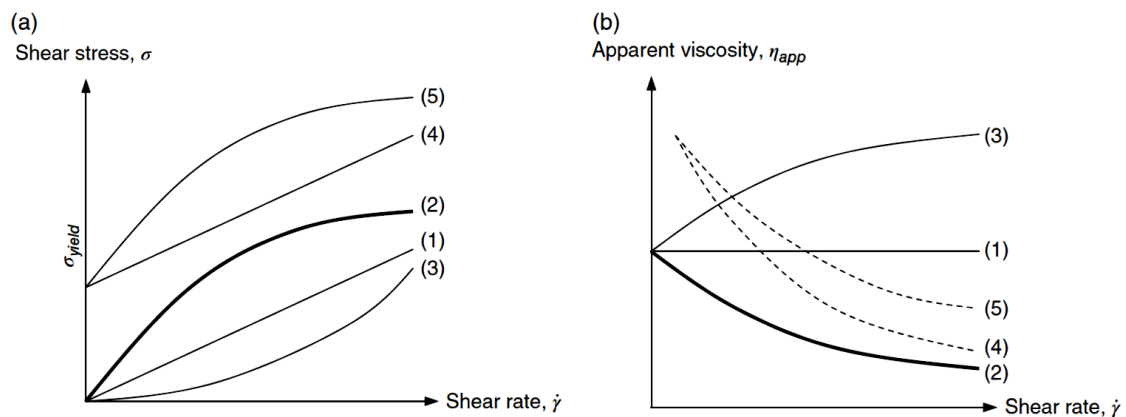


Figura II- 15. (a) Esfuerzo de cizalla y (b) viscosidad aparente como función de la velocidad de deformación para varios tipos de fluidos. (1) fluido newtoniano, (2) fluido pseudoplástico, (3) fluido dilatante, (4) fluido de Bingham y (5) plástico.

Las masas de pan y productos de pastelería tienen un comportamiento pseudoplástico. Los fluidos pseudoplásticos se caracterizan por tener tres regiones distintas (Figura II- 16): una región corta de comportamiento newtoniano, donde la viscosidad aparente es constante con los cambios de velocidad de deformación, una región intermedia donde la viscosidad aparente es dependiente de la velocidad de deformación y el modelo de ley de la potencia es aplicable para este fenómeno y una alta región newtoniana donde la pendiente de la curva es constante.

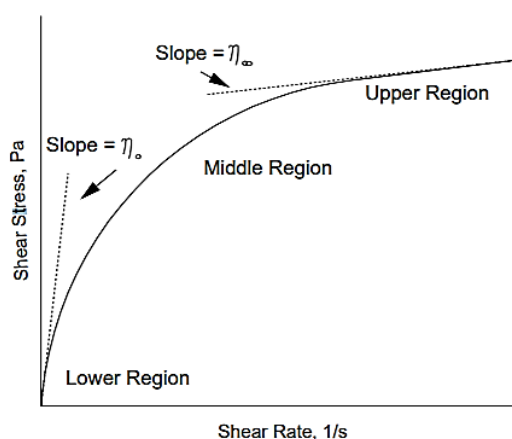


Figura II- 16. Reograma de un fluido pseudoplástico (Steffe, 1996).

El comportamiento viscoelástico de los fluidos se puede determinar a partir de ensayos dinámicos en las que las muestras se someten a un movimiento oscilatorio cuando se mantienen en un sistema de sujeción, normalmente un cono y plato o de platos paralelo. Por lo general, se aplica una deformación sinusoidal a la muestra, lo que provoca que se transmita cierto nivel de tensión a través del material. La magnitud y el intervalo de tiempo de la transmisión dependen de la naturaleza viscoelástica de la sustancia problema. En materiales viscosos (que son más líquidos), gran parte de la tensión se disipa en pérdidas por fricción, se transmite principalmente en materiales muy elásticos. Asimismo, el retardo de tiempo (también llamado retardo de fase) es mayor para sustancias muy viscosas y menor para materiales que presentan un alto grado de elasticidad. La investigación de este tipo de fenómenos conduce a la definición de varias funciones materiales como puede ser el módulo de pérdida (G'') o el módulo de almacenamiento (G').

2.2.4 Estimación y predicción de los cambios en los panqueques durante el cocinado

El modelado de productos y procesos alimentarios es una tarea complicada debido a la falta de conocimiento sobre los mecanismos por la complejidad de la naturaleza de los alimentos cuyas propiedades son muy cambiantes durante su procesado, la dificultad de describir las transformaciones que tienen lugar mediante ecuaciones que las expresen de forma cuantitativa, y al desconocimiento en muchos casos de las cinéticas que rigen los cambios de los parámetros de calidad (Trystram, 2012). La resolución de los modelos permite conocer variables del proceso como temperatura, presión o humedad, en diferentes puntos del alimento y su evolución durante el tiempo del procesado. Sin embargo, para que los datos obtenidos sean realmente útiles deben de ser capaces de dar información sobre la calidad y seguridad del alimento. Para ello es necesario incorporar al modelo las ecuaciones cinéticas que expresan los cambios de los parámetros de calidad del alimento.

En el cocinado de los alimentos por calentamiento por superficie caliente, la optimización y el control del proceso para obtener la calidad del producto final deseada se basa en gran medida en la experiencia en lugar de cálculos de ingeniería predictivos (Feyissa et al., 2011). El modelado y la simulación numérica pueden jugar un papel importante, proporcionando marcos adecuados y herramientas cuantitativas para un análisis sistemático (Purlis et al., 2021) para una predicción orientada a la asistencia al cocinado. Por ello existe la necesidad de comprender mejor los mecanismos fundamentales de los fenómenos involucrados y así desarrollar conocimientos científicos y herramientas útiles para describir y predecir el comportamiento de los alimentos durante su cocinado.

Diferentes atributos de calidad, como la textura, el espesor de la corteza, el contenido de agua, el aroma y el sabor, entre otros, contribuyen a la calidad global de un producto de panadería. Sin embargo, se sabe que el color de la superficie es una de los primeros atributos que percibe el consumidor, y se convierte en un factor decisivo para determinar la aceptabilidad de estos productos. Además, el color de la superficie es un indicador práctico del avance del proceso de cocción de este tipo de alimentos. Su

evolución puede ser fácilmente monitoreada durante el cocinado, por lo que se utiliza frecuentemente como indicador de fin de proceso (Ureta et al., 2014).

Muchos autores han utilizado la coordenada de color de luminosidad (L^*) para predecir el final de la cocción de los productos horneados. En este contexto, Broyart et al. (1998) lograron establecer un modelo predictivo ($R^2 = 0,96$) adaptado para crackers que relaciona L^* con la temperatura superficial. De hecho, el error de predicción de L^* osciló entre 1 y 24 % cuando la temperatura en la superficie del producto osciló entre 180 y 330 °C. Los resultados obtenidos fueron confirmados recientemente por Putranto et al. (2015) quienes informaron que un valor promedio entre 54 y 62 de L^* para la corteza del pan indicaba el final de la cocción. Sin embargo, Ameer et al. (2007) demostraron que L^* depende estrechamente de la sacarosa y la grasa utilizadas en la formulación, lo que podría generar confusión sobre el final del proceso de horneado y generar un mal producto. De hecho, los autores observaron un comportamiento de dorado no enzimático diferente entre las galletas formuladas con sacarosa que necesitan un tiempo de cocción prolongado (16,4 min) para alcanzar un nivel de dorado similar en comparación con las galletas formuladas con hexosa (15,1 min) a una temperatura de cocción de 200 °C. Zanoni et al. (1995) desarrollaron un modelo cinético para el cambio de color de la corteza del pan durante la cocción. El modelo propuesto, siguiendo una cinética de primer orden para el color absoluto (ΔE^*) y dependiente de la temperatura, se aplicó para predecir el color de la corteza durante la cocción del pan a 200 y 250 °C, los resultados solo fueron aceptables a 250 °C. Purlis y Salvadori (2007) encontró una tendencia lineal entre el cambio de color absoluto y la pérdida de peso del pan y propusieron un modelo matemático simple para predecir el desarrollo del color durante el horneado. Por otra parte, Gökmen y Şenyuva (2006) intentaron correlacionar la coordenada a^* con la formación de acrilamida en tres matrices alimentarias (café verde, harina de trigo y patatas fritas). Concluyeron que los cambios que se producía en la concentración de acrilamida y en a^* durante el calentamiento a temperaturas elevadas seguía un patrón cinético típico, por lo que sugirió que la coordenada a^* puede ser un indicador fiable de los niveles de acrilamida en los alimentos procesado térmicamente.

Durante el proceso de cocinado de los productos de cereales, la masa semifluida se transforma en pan, pasteles, bizcochos o galletas (Chandrasekaran, 2012). La transferencia de calor y masa durante el proceso de cocinado, ocurre simultáneamente e

induce muchos procesos físico-químicos complejos, como la evaporación del agua, la formación de costras, las reacciones de pardeamiento, la desnaturalización de las proteínas y la gelatinización del almidón (Mondal y Datta, 2008; Sablani et al., 1998; Therdthai y Zhou, 2003).

En la literatura, solo hay unas pocas publicaciones sobre el modelado de cocinado por contacto (Feyissa et al., 2011; Gupta, 2001; Sanz-Serrano et al., 2017) y el proceso de fritura por contacto (Pan y Singh, 2002; Pan et al., 2000; Wichchukit et al., 2001), en comparación con el horneado. Gupta (2001) estudió el cocinado por contacto de pan indio plano en un horno continuo con un modelo simplificado y determinaron diferentes parámetros térmicos, como el calor específico, la conductividad térmica y la difusividad térmica del pan indio. En el estudio de Feyissa et al. (2011) desarrollaron un modelo matemático de transmisión de calor y de transferencia de masa para el proceso de cocinado por contacto de tortitas con superficie caliente. En las suposiciones del modelo consideraron que el agua líquida se transfiere por difusión dentro de la tortita que simultáneamente tiene lugar la evaporación local, de forma que el vapor se genera en el interior de la masa y migra hacia la superficie superior de la masa difundiéndose en el aire ambiente. Se desprecia el transporte de calor que origina el movimiento del vapor y se considera que el calor se transfiere por conducción en el interior de la masa. El modelo, que predice la temperatura, el contenido de agua líquida en el producto y el agua en la fase de vapor, se validó experimentalmente. En todos estos trabajos, la distribución de temperatura de la superficie caliente fue uniforme, lo que es el mejor de los casos en un proceso de fritura por contacto. Sin embargo, cuando se considera una cocina doméstica, la fuente de calor generalmente proporciona una distribución de calor no uniforme, lo que puede provocar una distribución desigual de la temperatura en el recipiente de cocción. Sanz-Serrano et al. (2017) desarrollaron un modelo de cocción por contacto de tortitas en cocinas domésticas, en las que el calentamiento de los recipientes de cocción puede ser no uniforme. El modelo propuesto acopla los fenómenos de transferencia de calor y masa, y la cinética de cambio de color (determinado por la luminosidad L^*). De esta forma el modelo predice la distribución de la temperatura y del contenido de agua de la masa y del color de las tortitas cocidas a lo largo del proceso de cocción.

Muchos de los cambios químicos, reológicos y estructurales que ocurren dentro de los alimentos durante el cocinado son función de la temperatura, el contenido de

humedad y el tiempo (Fellows, 2017). El contenido de agua, mientras ocurren estos cambios, tiene un impacto muy importante en las propiedades finales del producto, por lo tanto, tiene gran relevancia evaluar la transferencia de masa en el interior del alimento durante el cocinado (Kayacier y Singh, 2003). Los modelos actuales no pueden predecir adecuadamente la influencia de la composición de la masa en los fenómenos de transferencia. En el caso de los modelos de cocción de masas batidas, la conductividad térmica y la densidad de la masa normalmente se expresan en función de los componentes de la masa (Feyissa et al., 2011; Sanz-Serrano et al., 2017), pero esta dependencia no es suficiente para explicar las tasas de evaporación durante la cocción en sartén de las diferentes masas. Pyle (2005) estudio el modelado de una especie de pasteles que parten de una masa batida y observó que el rol de cambios reológicos y contenido de agua en el producto final muestra que las propiedades reológicas son un factor crucial en la determinación de la estructura final del producto. Observó que la cinética de cambio en las propiedades viscoelásticas de la masa es un proceso impulsado por la cinética de gelatinización. A diferencia de muchos procesos alimentarios impulsados térmicamente, las tasas de calentamiento son tales que la cinética de gelatinización no puede despreciarse.

El modelado de la cocción de panqueques por contacto con una superficie caliente es una tarea compleja debido a la dificultad de rastrear los fenómenos de transferencia de calor entre la superficie de la sartén y la masa, las transformaciones fisicoquímicas notables en la masa durante el proceso y la consiguiente modificación en la conductancia entre la masa y la sartén.

2.3 CAMBIOS EN LA PASTA DURANTE EL COCINADO

2.3.1 Cambio de la estructura en la pasta durante el cocinado

La pasta seca es un producto alimenticio tradicional a base de cereales cada vez más popular en todo el mundo debido a su conveniencia, palatabilidad y calidad nutricional (Petitot et al., 2009a). La sémola de trigo duro (*Triticum durum*) es reconocida como la materia prima más adecuada para la producción de pasta debido a su contenido relativamente alto de pigmentos amarillos, una baja actividad lipoxigenasa y un alto contenido de proteínas que favorecen una buena calidad de cocción (Aalami et al., 2007).

2.3.1.1 Papel del almidón y de las proteínas en la pasta

El almidón (74-76% del peso en seco) y las proteínas (12-15% del peso en seco) son los componentes principales de la sémola de trigo duro (Petitot et al., 2009a).

La idoneidad de la sémola para la fabricación de pasta está asociada fundamentalmente a la cantidad y calidad de las proteínas, que formen tras la cocción, una red continua que atrape los gránulos de almidón. Además, durante el procesado, la masa correspondiente para soportar las numerosas tensiones físicas que se producen durante la elaboración (Liu et al., 1996).

Los primeros estudios sobre la ultraestructura de la pasta, en los años 1980s (Resmini y Pagani, 1983) confirmados por estudios posteriores (Bruneel et al., 2010; De Noni y Pagani, 2010), permitieron observar que la pasta con una buena calidad tras la cocción, es la que presenta una red proteica tridimensional continua, elástica, casi no-deformable que rodea cada gránulo de almidón.

La cantidad de proteína en el trigo duro es el primer parámetro que los productores de pasta seca consideran a la hora de elegir la materia prima. Se han establecido clasificaciones utilizadas en Italia en el ámbito del trigo duro, en las que la sémola se clasifica en tres clases en función de su contenido en proteínas: entre el 10,5% y el 11,9% (calidad baja) entre el 12,0 y el 13,5% (calidad media) y superior al 13,5% (sémola de calidad excelente). De hecho, una elevada cantidad de proteína es el requisito previo para una masa en la que la matriz de gluten es suficientemente gruesa y está bien desarrollada incluso en condiciones de hidratación no óptimas, como las utilizadas en la fabricación

de pasta (es decir, un contenido de humedad del 30-32%). El contenido de proteína del trigo duro tiene una gran influencia en la calidad de cocción de la pasta, siendo los fabricantes de pasta los que prefieren un mayor contenido de proteína en grano (alrededor del 30% en base húmeda y mayor del 11% en base seca) para garantizar una buena tolerancia a la sobrecocción, una elevada firmeza, una baja pegajosidad y una baja pérdida de cocción (Degidio et al., 1990; Dexter y Matsuo, 1977; Matsuo et al., 1972). La pasta seca elaborada con sémola de alto contenido proteico es físicamente más resistente y elástica que la elaborada con sémola de bajo contenido proteico (Lafiandra et al., 2022). Pero se ha establecido, que tan importante es la cantidad de proteína como la calidad de las fracciones proteicas implicadas. A este respecto, se ha demostrado que la idoneidad del trigo duro en la fabricación de pasta está relacionada con combinaciones específicas de alelos en los loci de proteínas de almacenamiento: alelos de glutenina en el locus Glu-B3 de bajo peso molecular y en el locus Glu-B3 de alto peso molecular locus Glu-B1 (Mastrangelo y Cattivelli, 2021). Por otra parte, en el trigo duro, la formación de una estructura adecuada para la fabricación de pasta está relacionada con la alta densidad de enlaces cruzados entre las cadenas más cortas de las gluteninas (Edwards et al., 2003).

La red proteínica desarrollada durante la fase de mezcla y amasado de la elaboración de la pasta se estabiliza mediante enlaces covalentes (enlaces disulfuro) y otros de menor energía, como puentes de hidrógeno e interacciones hidrofóbicas entre residuos de aminoácidos no polares (Sissons, 2008).

Se han propuesto diversos enfoques -desde moleculares hasta macroscópicos para evaluar la calidad proteica de la sémola de trigo duro. Los métodos basados en propiedades reológicas (Mixograph, Alveograph, Glutograph, Glutopeak, Mixolab...) son los más habituales y han sido recientemente revisados por Cecchini et al. (2021).

El almidón es el principal componente de la sémola y está compuesto por dos tipos de moléculas de polisacáridos (amilosa y amilopectina), en proporciones y características que dependen de la materia prima. De los tres tipos de almidón existentes A, B y C (Cui y Zhu, 2019; Kim et al., 2012), el almidón de trigo pertenece al grupo A. A este grupo pertenecen también los almidones de otros cereales como el maíz y el arroz. El tipo B son almidones con alto contenido de amilosa como el almidón de tubérculos, por ejemplo, el de patata. Por otro lado, los almidones de tipo C provienen de leguminosas, raíces y frutas

como los almidones de tapioca y frijol mungo (Kim et al., 2012; Okur et al., 2021). Durante el desarrollo del grano de trigo, el almidón se deposita en el endospermo como agregados discretos semicristalinos denominados gránulos de almidón. En los granos maduros de trigo se pueden distinguir dos tipos de gránulos: gránulos tipo-A, lenticulares, con diámetro medio entre 2-3 μm , y gránulos tipo-B, esféricos, y con diámetro medio de 30 μm (Buleon et al., 1998) (Figura II- 17). Estos dos tipos de gránulos no son exclusivos del trigo. Dundar et al. (2009) demostraron que el almidón de patata también está compuesto por gránulos más grandes y más pequeños. Estos dos tipos de gránulos tienen diferentes propiedades físicas, químicas y funcionales (Ellis et al., 1998; Zeng et al., 2011). El almidón está compuesto por dos polímeros: la amilosa y la amilopectina. En los cereales más comunes, los almidones contienen entre 72-82% de amilopectina y 18-33% de amilosa (Buleon et al., 1998). La amilosa se define como una molécula esencialmente lineal, compuesta por 500-6000 unidades de glucosa unidas por enlaces α -(1-4), con escasos puntos de ramificación formados por enlaces α -(1-6) (Shibanuma et al., 1994). La amilopectina está formada por una cadena central similar a la de la amilosa pero posee ramificaciones con enlaces α -(1-6) cada 9 a 20 unidades de D-glucosa (Whistler y Daniel, 1984).

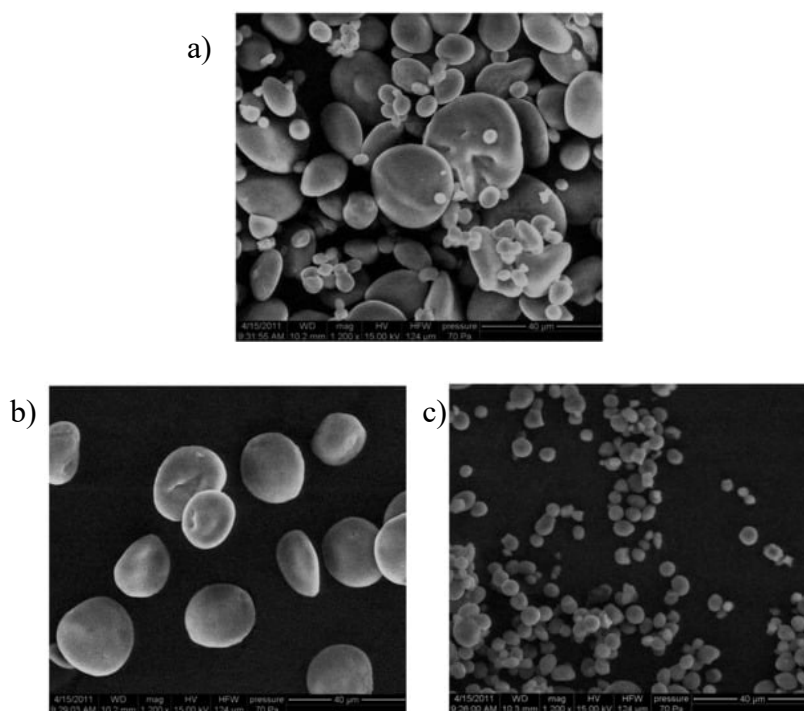


Figura II- 17. Microscopía electrónica de barrido de gránulos de almidón no fraccionado (a) y gránulos A (b) y gránulos B (c) aislados (1200x) (Zeng et al., 2011).

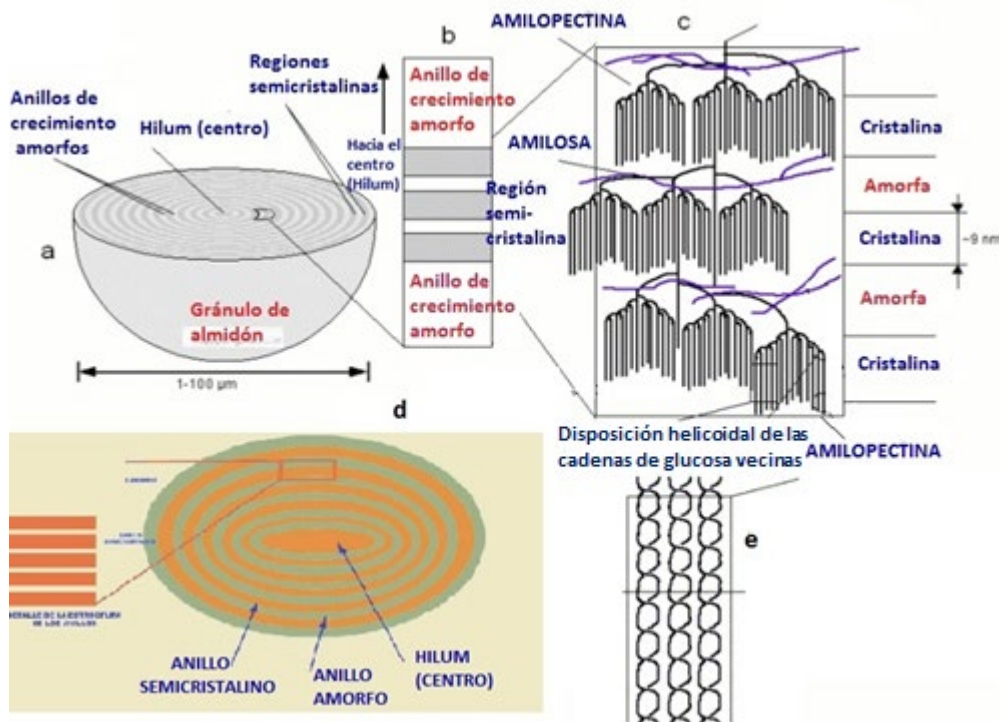


Figura II- 18. a y d: Representación esquemática de un corte transversal de un gránulo de almidón. Se observan las regiones semicristalinas y los anillos de crecimiento amorfos alternante; b: Ampliación de la región semicristalina y anillos de crecimiento amorfos; c: Ampliación de la región semicristalina. Formada principalmente por amilopectina (altamente ramificada) y algo de amilosa; e: Disposición helicoidal entre dos cadenas de glucosa vecinas de la amilopectina. Esta organización de las cadenas forma las zonas cristalinas dentro del gránulo. Adaptado de Velišek (2014).

La organización intramolecular entre amilosa y amilopectina, conduce a la formación de regiones cristalinas (densas con un alto número de ramificaciones) y regiones amorfas (menos organizadas), ordenadas en capas alternas de forma radial (Figura II- 18). Las ramas agrupadas en paralelo de la amilopectina se encuentran plegadas como dobles hélices. Es este empaquetamiento de las estructuras en doble hélice lo que forma las pequeñas áreas cristalinas muy densas que alternan con las menos densas y amorfas (Fennema et al., 2010).

Cuando el almidón se calienta en agua, las interacciones fisicoquímicas entre amilosa y amilopectina se modifican. Como resultado, se pueden detectar diferentes cambios estructurales de los gránulos de almidón: transición vítrea, gelatinización y fusión del complejo amilosa-lípido (Figura II- 19).

La transición vítrea está inducida por la temperatura y consiste en la transición de un estado “vítrea” del almidón a un estado progresivamente más viscoso (Benczedi et al.,

1998). La evidencia directa de la transición vítrea se caracteriza por un incremento en la capacidad calorífica de la muestra. Cuando el almidón se calienta en agua, los puentes de hidrógeno de la región amorfa del gránulo se rompen y el agua se asocia a los grupos hidroxilos libres. Por encima de la temperatura de transición vítrea, se produce el cambio de estado de vítreo a viscoso que a su vez facilita la movilidad molecular de las regiones amorfas, proceso que es reversible y que permite la hidratación y el hinchamiento del gránulo. Posteriormente, ocurre la transición molecular irreversible, la disociación de las dobles hélices propias de la región cristalina. Estos cambios estructurales se denominan gelatinización del almidón y permiten cambiar la forma cristalina de los gránulos a una forma amorfa y digerible (Schirmer et al., 2015). Además de la pérdida de la cristalinidad, del hinchamiento, y la distorsión de los gránulos (debido a una mayor asociación de agua), durante la gelificación se produce una solubilización limitada del almidón (principalmente lixiviación de amilosa), lo que aumenta la viscosidad de la suspensión de almidón. La lixiviación de amilosa puede atribuirse a la separación de fases de amilosa y amilopectina debido a que presentan inmiscibilidad entre ambas (Goesaert et al., 2005; Kalichevsky y Ring, 1987). Durante el calentamiento por encima de la temperatura de gelatinización, continua el hinchamiento y la lixiviación y se forma una pasta de almidón que consiste en una suspensión de gránulos hinchados amorfos y macromoléculas solubilizadas (principalmente amilosa). En resumen, la gelatinización del almidón se define como la destrucción del orden molecular dentro del gránulo de almidón, incluidos todos los cambios asociados e irreversibles que provocan la alteración de sus propiedades (Day et al., 2013; Fukuoka et al., 2002; Schirmer et al., 2015; Tester y Sommerville, 2001).

La técnica termoanalítica de calorimetría diferencial de barrido (DSC) es una herramienta que se emplea para identificar cambios estructurales del almidón a través del registro del flujo de energía. La pérdida de cristalinidad que se produce durante la gelatinización del almidón se mide como una transición térmica de primer orden. Al analizar la gelatinización, se determinan cuatro parámetros: la temperatura de inicio (T_0), la temperatura de pico (T_p), la temperatura final (T_c) y la entalpía de gelatinización (ΔH). La entalpía, el área integrada bajo el pico de transición térmica, se puede referir a la intensidad de la gelatinización. La temperatura de inicio de gelatinización para el almidón procedente de trigo se sitúa entre 48,1-58,4 °C. Los cambios estructurales de los gránulos

de almidón que se producen en la gelatinización ocurren en un rango de temperaturas característico de cada tipo de almidón (Schirmer et al., 2015). Típicamente, el almidón se hidrata a temperaturas que van desde 40 a 120 °C, dependiendo del origen del almidón y del contenido de amilosa (Haralampu, 2000). A temperatura ambiente y en presencia suficiente de agua, los gránulos de almidón absorben hasta el 50% de su peso seco de agua. Por lo tanto, se hinchan sólo de forma limitada (French, 1984).

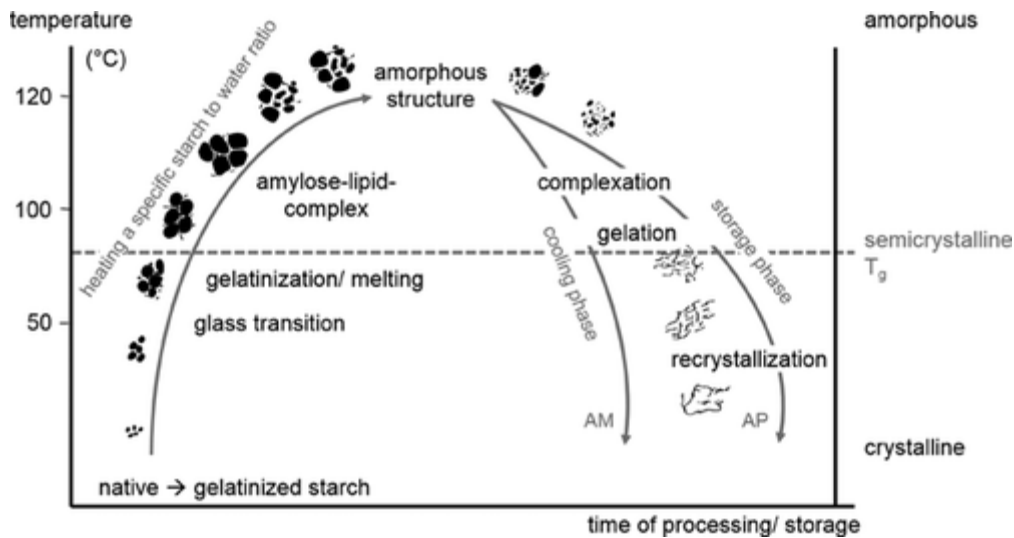


Figura II- 19. Diagrama de fase que muestra el estado y la transición de fase del almidón al calentarlo en agua. El almidón sufre una transición de una estructura cristalina a una amorfa cuando se calienta y una recrystalización posterior cuando se enfría y durante el almacenamiento (T_g , temperatura de gelatinización; AM, amilosa; AP, amilopectina) (Schirmer et al., 2015).

Al enfriarse, el almidón sufre un proceso de reasociación relativamente lento, comúnmente denominado retrogradación, que ocurre entre los 80 y 95 °C (Wang et al., 2015). Durante la retrogradación, las moléculas de almidón se vuelven a asociar y pueden formar estructuras compactas estabilizadas por enlaces de hidrógeno (Colonna et al., 1992; Morris, 1990). El proceso de asociación puede verse favorecido aún más por la deshidratación. Estas estructuras son térmicamente muy estables y solo pueden rehidratarse a 80 - 150 °C, según el grado y la naturaleza de la retrogradación. La amilosa se lixivia de los gránulos a la solución como un polímero en espiral aleatorio. Al enfriarse, se forman dobles hélices entre las moléculas de amilosa que se solubilizaron durante la gelatinización, estabilizadas por enlaces de hidrógeno (Wu y Sarko, 1978). Después de algunas horas, estas dobles hélices forman estructuras cristalinas muy estables (Figura II-20). La recrystalización de las cadenas laterales cortas de la amilopectina es un proceso mucho más lento (varios días o semanas) y se produce en los gránulos gelatinizados o en

los restos de gránulos (Miles et al., 1985). Por lo tanto, la retrogradación de la amilosa determina en gran medida la dureza inicial de un gel de almidón, mientras que la retrogradación de la amilopectina determina el desarrollo a largo plazo de la estructura del gel y la cristalinidad (Goesaert et al., 2005; Miles et al., 1985)

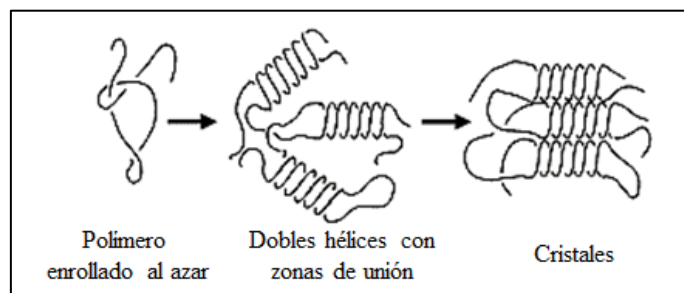


Figura II- 20. Esquema de retrogradación de la amilosa (Haralampu, 2000).

A menudo se considera que la retrogradación del almidón tiene efectos indeseables ya que es el mecanismo principal del envejecimiento de los productos ricos en almidón, cambiando el sabor y el aroma y provocando la pérdida de la textura crujiente (Morris, 1990). Esto que pueden reducir la vida útil y la aceptación por parte del consumidor y provocar un desperdicio significativo (Wang et al., 2015). Sin embargo, la retrogradación del almidón es deseable en algunas aplicaciones, como en la producción de cereales para el desayuno, arroz sancochado, puré de patatas deshidratado y fideos de arroz chino, debido a la modificación de las propiedades estructurales, mecánicas y sensoriales (Abd Karim et al., 2000). La retrogradación del almidón se asocia al contenido en almidón resistente y por lo tanto tiene importancia desde el punto de vista nutricional, como se comentará más adelante.

Los complejos de amilosa-lípido pueden estar presentes de forma natural en los almidones de cereales (Evans, 1986; Morrison et al., 1993) o formarse posteriormente a la gelatinización del almidón en presencia de lípidos. Los complejos de amilosa se pueden dividir en dos estados distinguibles: el tipo I menos ordenado y el tipo II semicristalino, que se denominan complejos de inclusión de amilosa. Los complejos de tipo I se disocian típicamente a temperaturas entre 95 y 105 °C (Galloway et al., 1989; Karkalas et al., 1995), mientras que los complejos de tipo II se forman calentando la mezcla de amilosa-ligando a temperaturas superiores a 90 °C (Karkalas et al., 1995). Las entalpías endotérmicas de ambos complejos de amilosa se han descrito como muy similares y bastante independientes de la longitud de la cadena del lípido. Por tanto, en algunos

estudios se puede encontrar una descripción de un solo tipo de complejo de amilosa (Godet et al., 1995; Putseys et al., 2010a; Putseys et al., 2010b). Debido a la alta temperatura de disociación, no se observa la fusión de los complejos de inclusión de amilosa en muchos productos alimenticios (Schirmer et al., 2015).

2.3.1.2 Cambios durante el cocinado

La calidad de la pasta viene definida por la estructura del almidón y las proteínas y las interacciones entre ellos durante el procesamiento y la cocción. Para obtener pasta con buena calidad de cocción y atributos de textura aceptables, es fundamental desarrollar una red de proteínas con un buen equilibrio entre elasticidad y extensibilidad durante el procesamiento (Fu, 2008; Petitot et al., 2009b).

Para poder controlar la calidad de la cocción de la pasta es fundamental conocer tanto los cambios estructurales que ocurren en la superficie de la pasta como los que se producen en la microestructura interna.

Dexter et al. (1978) y Cunin et al. (1995) aplicaron microscopía electrónica para evaluar los efectos de la cocción, mientras que Zweifel et al. (2003) utilizaron la microscopia confocal de barrido láser y comprobaron que la red proteica sufre disrupción en zonas próximas a la superficie.

Ohmura et al. (2021) han utilizado recientemente la técnica de microscopía de láser para analizar la rugosidad de la superficie de la pasta, junto con microscopía de luz polarizada y microscopía de fluorescencia para analizar el avance de la gelatinización del almidón.

Durante la cocción de la pasta, el agua penetra en la matriz proteica a través de fisuras de esta película presente en la superficie de la pasta, Figura II- 21 A (Cunin et al., 1995; Dexter et al., 1978). La superficie de la pasta se vuelve lisa y las proteínas se hidratan, se expanden en volumen y producen tensiones que conducen a la formación de fracturas adicionales. La absorción de agua por la matriz de proteínas genera un gradiente de difusión móvil desde la superficie hasta el centro de la pasta mientras tiene lugar la gelatinización (Fardet et al., 1998a). Estos cambios en la estructura de la matriz favorecen una mayor penetración de agua, lo que conlleva a un ablandamiento de la pasta. Todos estos fenómenos crean una estructura compleja y porosa, que contiene una red

filamentosa y restos de gránulos hinchados que dan a la estructura interna de la pasta un apariencia de panal, a través del cual se intercambian agua y sólidos durante la cocción, Figura II- 21 B y C (Cunin et al., 1995; Fardet et al., 1998a; Fardet et al., 1998b).

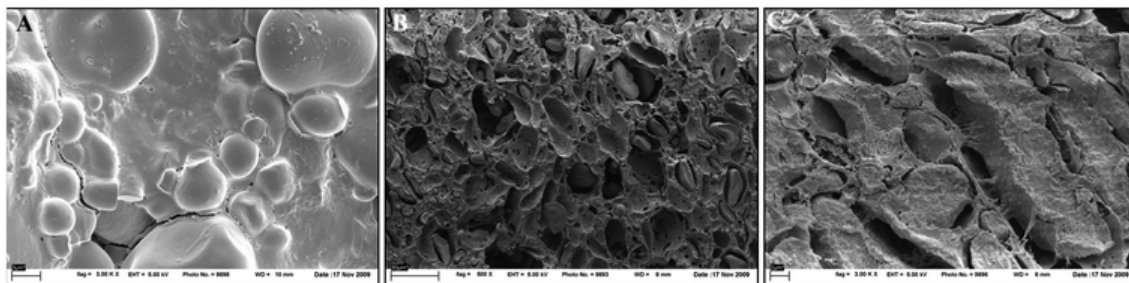


Figura II- 21. Microscopía electrónica de barrido (SEM) típica de la superficie de la pasta seca sin cocer (A) y la sección transversal de la pasta cocida (B y C). Ampliación 3000 $\times$ (A y C) y 500 $\times$ (B). (Bustos et al., 2015).

Durante la cocción el agua difunde y simultáneamente se absorbe, estableciéndose una competencia entre dos mecanismos: hinchamiento y gelatinización de los gránulos de almidón, e hidratación y coagulación de proteínas (Dexter et al., 1978). Dado que tanto la coagulación de las proteínas como el hinchamiento del almidón comienzan aproximadamente en el mismo rango de temperatura y bajo las mismas condiciones de humedad, ambas transformaciones son competitivas y antagónicas (Resmini y Pagani, 1983). Esto significa que ambos componentes compiten por el agua y que el hinchamiento del almidón se opone a la formación de la matriz proteica. La prevalencia de uno de estos mecanismos definirá el comportamiento durante la cocción de la pasta. Si prevalece la coagulación de proteínas, la matriz de proteínas se consolida y el almidón queda atrapado en esa red (Delcour et al., 2000; Petitot et al., 2009b), el agua penetra lentamente y se produce una gelatinización gradual y la pasta cocida estará firme y sin pegajosidad en la superficie, por lo que se obtiene una pasta de buena calidad (De Noni y Pagani, 2010). Por otro lado, cuando la red de proteínas no es lo suficientemente fuerte y elástica, predomina el hinchamiento y la solubilización del almidón, la matriz de gluten tiende a descomponerse con la liberación de amilosa al agua de cocción (Resmini y Pagani, 1983), mientras que la amilopectina permanece en la superficie aumentando la pegajosidad de la pasta (Feillet et al., 1989).

Las condiciones en las que se haya llevado a cabo el secado de la pasta, generan una determinada organización estructural del almidón y de las proteínas que afecta posteriormente a las propiedades de la pasta cocida. En la Figura II- 22 se muestra un

esquema realizado a partir de imágenes de microscopía electrónica de transmisión de los cambios que se producen en la estructura de la pasta seca y cocida, con respecto a la coagulación de las proteínas, la hinchazón del almidón y su dispersión de partículas. Los círculos vacíos representan partículas de almidón y los puntos negros proteínas. Las figuras superiores son de pasta seca cruda: la imagen “a” corresponde a un secado a baja temperatura, la “b” a un secado a alta temperatura y bajo contenido en humedad, y la “c” a un secado a alta temperatura y alto contenido en humedad. Las figuras inferiores son de pasta cocida: la imagen “d” es de pasta blanda y pegajosa y la “e” de pasta firme. La transición de “a” a “d” muestra el uso de materia prima de baja calidad. La transición de “a” a “c” implica materia prima de alta calidad. La pasta “b” es bastante independiente de la calidad de la materia prima, mientras que el estado “c” está relacionado con mala calidad (Resmini y Pagani, 1983).

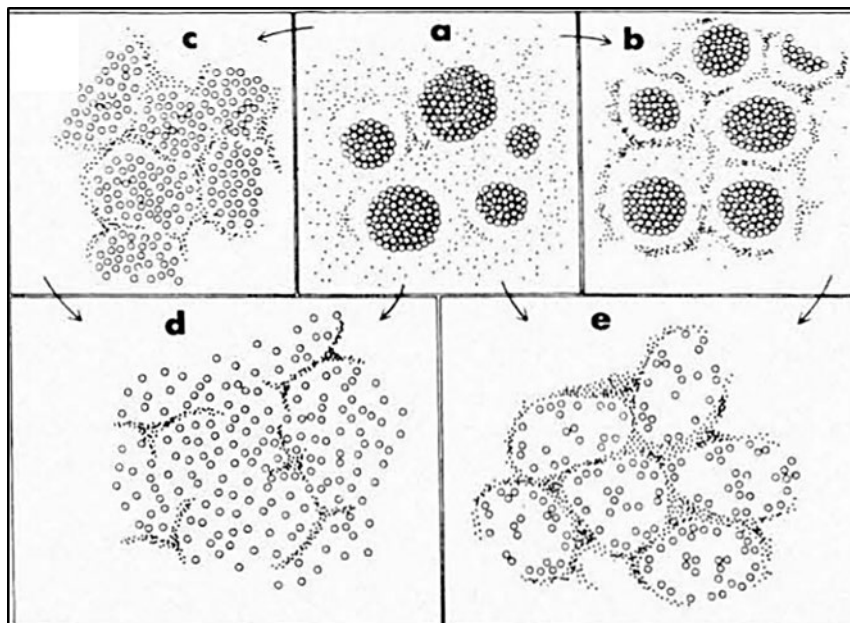


Figura II- 22. Esquema de los cambios que ocurren en la estructura de pastas secas (a, b, c) y cocidas (d y e) respecto a la coagulación de proteínas, hinchamiento del almidón y la lixiviación de partículas. Círculos vacíos corresponden a las partículas de almidón; puntos negros representan las partículas de proteína (Resmini y Pagani, 1983).

Una buena polimerización de las proteínas durante el procesamiento y/o cocción de las pastas es fundamental para la obtención de productos de buena calidad. Cuando las proteínas han polimerizado con demasiada fuerza durante el procesamiento en severas condiciones de secado, carecen de elasticidad para hacer frente al hinchamiento del almidón durante la cocción, lo que conlleva mayores pérdidas durante la cocción y pastas

más pegajosas. Por otra parte, cuando las proteínas están menos polimerizadas como consecuencia de un proceso de secado suave, la polimerización se produce sobre todo durante la cocción, y la matriz de proteínas permite un hinchamiento progresivo del almidón, lo que resulta en una pasta, más firme y de mayor calidad (Bruneel et al., 2010).

La calidad de la pasta cocida depende, también en gran medida de las condiciones de cocción. Hay diversas variables a considerar al cocinar la pasta que pueden afectar a la calidad final, como es el tipo de agua, el recipiente de cocción, la relación de agua/pasta, la temperatura, el tiempo de cocción, y el tiempo transcurrido entre el escurrido y el consumo (Murray et al., 2017). El tipo de agua utilizada juega un papel importante en la calidad final de la pasta. Malcolmson y Matsuo (1993) observaron que el tipo de agua utilizada tenía un efecto significativo sobre la pegajosidad de la pasta. La pasta era más pegajosa cuando se cocinaba en agua del grifo, agua de pozo o agua dura que cuando se cocinaba en agua desionizada. Dexter et al. (1983) también llegaron a la conclusión de que la dureza del agua aumentaba la pegajosidad y las pérdidas por cocción. Abecassis et al. (1981) y Alary et al. (1979) encontraron que se obtenía una mejor calidad de la pasta cocinando la pasta con agua a un pH de 6; la pasta así cocinada presentaba una menor pegajosidad, mientras que a otros pHs más ácidos o alcalinos la pegajosidad aumentaba.

Otro aspecto que se ha estudiado es la influencia en la calidad de la pasta cocida de la relación agua:pasta. En el ámbito culinario se suele recomendar una relación agua/pasta de 12,5 a 8,3 L/kg (McGee, 2009) y la mayoría de los fabricantes de pasta recomienda utilizar 10 L de agua por kg de pasta. En el estudio De la Peña y Manthey (2014) se concluye que relaciones agua:pasta mayores evitan la caída de temperatura en el agua de cocción al adicionar la pasta y que por lo tanto, se tenga que prolongar el tiempo de cocción. La relación agua:pasta en el intervalo analizado (8,3-30,7) no afecta a la firmeza de la pasta, pero sí a las pérdidas por cocción que fueron más elevadas al aumentar la proporción agua:pasta. Sin embargo, Cimini et al. (2019a) sugirieron una relación agua/pasta más pequeña en base a consideraciones de impacto medioambiental, ya que no encontraron diferencias en la calidad de la pasta tras la cocción empleando proporciones de 10 a 3 L de agua /kg de pasta. Por otra parte, en el método aprobado por la AACCC (International, 1989) para la determinación del tiempo óptimo de cocción de la pasta, se establece una relación de 12 L de agua destilada por kg de pasta.

La textura de la pasta cocida es el criterio principal para evaluar la calidad de este producto y juega un papel dominante junto con la apariencia en la aceptación del consumidor, siendo mucho menor la influencia del sabor (Murray et al., 2017). Las propiedades de textura de la pasta cocida se pueden medir mediante evaluación sensorial o mediante métodos instrumentales. Aunque existen distintas ventajas para cada técnica, ambas deben estandarizarse cuidadosamente para proporcionar resultados significativos y reproducibles (Marchylo et al., 2004).

El análisis sensorial proporciona información de utilidad en el caso de la pasta. El número de panelistas varía según el estudio y el país, desde paneles italianos entrenados de tres miembros hasta diez o más (Cole, 1991). El análisis sensorial de la pasta es valioso debido a que se pueden valorar muchos atributos de textura simultáneamente. Sin embargo, el análisis sensorial es caro, requiere de mucho tiempo y está sujeto a variaciones inherentes al propio método, lo que lleva a muchos investigadores a emplear métodos de análisis químicos e instrumentales (Murray et al., 2017).

Desde hace años, se ha realizado un gran esfuerzo para establecer métodos instrumentales para medir las propiedades de textura de la pasta cocida. Matsuo y Irvine (1969) desarrollaron un aparato para medir la firmeza de los espaguetis con el que se simulaba la mordida aplicando una fuerza que aumentaba continuamente en un filo que descansa sobre una muestra de espaguetis. Se encontró que los resultados se correlacionan con las mediciones sensoriales de firmeza (Matsuo y Irvine, 1974). Además, el aparato se adaptó para la medida de otros parámetros de textura como masticabilidad o elasticidad utilizando una cuchilla de hoja desafilada para simular la compresión y luego medir la recuperación (Matsuo y Irvine, 1971). A partir de las curvas de compresibilidad-recuperación resultantes se obtenían los valores de estos parámetros.

La American Association of Cereal Chemistry (AACC, 2000) propuso un método estandarizado (66-50.01) para la determinación de la firmeza que requiere el uso de un analizador de textura y que especifica claramente el procedimiento de preparación de la muestra y los ensayos que deben completarse. Sin embargo, pese a ser el método utilizado habitualmente en los estudios científicos sobre el cocinado de pasta, posee algunas debilidades como la falta de especificaciones para el recipiente de cocción, la temperatura de medio de cocción la variabilidad al determinar el grado de cocción de la pasta, las

diferencias entre los texturómetros y el tiempo transcurrido entre la cocción y el análisis (De la Peña y Manthey, 2014; Sissons et al., 2008a; Sissons et al., 2008b). Los fabricantes de texturómetros han desarrollado accesorios específicos para pasta que permiten cuantificar la fuerza necesaria para estirar, comprimir o cortar pasta cocinada, como la cuchilla a utilizar en el método 66-50.01 (AACC, 2000).

2.3.2 Propiedades de cocción de la pasta

La determinación de las propiedades tecnológicas es de gran importancia para definir la calidad de la pasta. La evaluación tecnológica adecuada de la pasta requiere la consideración de varios factores, incluidas las propiedades de cocción y textura de la pasta (Bianchi et al., 2021). Las propiedades de cocción que se utilizan para evaluar la calidad de la pasta son el tiempo de cocción óptimo, las pérdidas por cocción, el índice de absorción de agua y el índice de hinchamiento (Nilusha et al., 2019).

Uno de los primeros parámetros tecnológicos evaluados de la pasta suele ser el tiempo óptimo de cocción (OCT), definido como el tiempo necesario para que desaparezca el núcleo central cuando la pasta se comprime suavemente entre dos placas de vidrio, tal y como se describe en el método aprobado 66-50.01 de la AACC (AACC, 1989). Cuando la pasta está cocida, se pueden distinguir fácilmente dos zonas: una región hinchada en la superficie y el núcleo central no penetrado, esta discontinuidad se desplaza hacia el centro de la muestra y desaparece una vez que ha alcanzado el tiempo de cocción óptimo. La pasta cocida de buena calidad también se conoce como "al dente". Este atributo cumple con ciertas expectativas del consumidor (Antognelli, 1980; Chillo et al., 2009) y es un indicador importante del OCT. El tiempo de cocción tiene una fuerte influencia en la calidad (Martinez et al., 2007). Dziki y Laskowski (2005) comprobaron que extender el tiempo de cocción conduce a una disminución de la firmeza de la pasta y a un aumento de las pérdidas por cocción. Además, De la Peña et al. (2015) observaron que cuando el tiempo de cocción de la pasta se extendía a 18 minutos, se reducía el contenido total de almidón y aumentaba el almidón dañado, y por lo tanto los parámetros reológicos y la solubilidad de las proteínas disminuían significativamente.

El OCT para la pasta también se puede determinar mediante la absorción de agua y la gelatinización del almidón (Delcour et al., 2000; Grzybowski y Donnelly, 1979) o a partir de medidas de calorimetría diferencial de barrido (DSC) y análisis de imágenes

(Riva et al., 2000; Sozer et al., 2007). Cocci et al. (2008) evaluaron el OCT de la pasta cocida en microondas como el tiempo para alcanzar el mismo valor de absorción de agua que la pasta cocida tradicionalmente. Dado que la hidratación de la pasta durante la cocción y la sobrecocción afecta fuertemente las propiedades mecánicas, el análisis de textura podría ser una forma alternativa de evaluar la OCT mediante la medida de la firmeza de la pasta (Edwards et al., 1993; Piazza et al., 1994).

Otra de las propiedades de cocinado que determina la calidad de la pasta son las pérdidas por cocción. Los sólidos que se difunden desde la estructura de la pasta al agua de cocción se conocen como pérdidas por cocción y este parámetro se usa comunmente para predecir el rendimiento de cocción de la pasta. Las pérdidas por cocción se evalúan mediante la liberación de sólidos de la pasta al agua de cocción. La pasta debe liberar una cantidad mínima de material en el agua de cocción para una máxima aceptación por parte del consumidor (Diamante et al., 2019). El límite de buena calidad se establece en unas pérdidas por cocción del 8%. Cuanto mayor sea la pérdida de cocción, es decir, la lixiviación de material de la capa exterior de pasta en el agua de cocción, más pegajosa será la pasta (Del Nobile et al., 2005; Dziki y Laskowski, 2005; Soh et al., 2006). Estos sólidos son principalmente amilosa, con solo una pequeña presencia de amilopectina, y con pequeñas cantidades de polisacáridos y proteínas (Matsuo et al., 1992).

La cantidad de agua absorbida durante la cocción está asociada con el hinchamiento y la gelatinización del almidón y está relacionada con el índice de hinchamiento, que es una indicación de la integridad de la matriz proteica. Una red de gluten debilitada permite una mayor absorción de agua de los gránulos de almidón y una gelatinización más rápida, provocando un aumento del índice de hinchamiento. Generalmente, una pasta de buena calidad, sin la inclusión de ingredientes adicionales, tiene una absorción de agua en el rango de 150-200 g de agua /100 g de pasta y un índice de hinchamiento de 1,8 aproximadamente (Bustos et al., 2015).

2.3.3 Cambios de las propiedades nutricionales de la pasta durante el cocinado

2.3.3.1 Índice glucémico

El índice glucémico (IG) de los alimentos fue introducido por Jenkins et al. (1981) con el objetivo de clasificar los carbohidratos de los diferentes alimentos en función de

sus efectos sobre la glucemia postprandial. Se define como el área bajo la curva de glucosa en sangre tras el consumo de un alimento, en relación con la curva producida por un alimento de referencia (solución de glucosa o pan blanco). Se ha demostrado que los alimentos con valores altos de IG se digieren y absorben más rápidamente, provocando mayores fluctuaciones en la glucosa en sangre por unidad de carbohidrato que los alimentos con valores más bajos de IG (Brand-Miller et al., 2009). El IG de los alimentos a base de carbohidratos generalmente varía de 20 a 90. Se han definido valores umbrales para la clasificación en función del IG, se considera IG alto cuando es mayor de 70, IG medio cuando esta entre 55-70 e IG bajo cuando es menor de 55 (Bornet et al., 2007).

La pasta es un producto alimenticio con bajo índice glucémico (Atkinson et al., 2008; Brand-Miller et al., 2009; Tudorica et al., 2002). Los azúcares de la pasta se liberan progresivamente durante la digestión, lo que conduce a una baja glucosa en sangre postprandial y a respuestas lentas de insulina (Granfeldt y Bjorck, 1991; Jenkins et al., 1983). También se ha asociado a una posible reducción del riesgo de cáncer de esófago (Bosetti et al., 2000). El bajo IG de la pasta se puede atribuir a su estructura específica, su estructura compacta es uno de los factores que se han propuesto para explicar este IG bajo (Barkeling et al., 1995; Bjorck et al., 1994; Granfeldt y Bjorck, 1991; Granfeldt et al., 1991; Wolever et al., 1986), pero se han propuesto otros numerosos factores para explicar las diferentes tasas de degradación del almidón. De hecho, la superficie accesible a las enzimas digestivas (Granfeldt et al., 1991), la encapsulación de los gránulos de almidón por fibras (Brennan et al., 1996) y proteínas (Colonna et al., 1990; Fardet et al., 1998b), y la estructura física del almidón, como su grado de gelatinización o retrogradación, y su relación amilosa/amilopeptina (Akerberg et al., 1998; Holm y Bjorck, 1988) se ha demostrado que afectan a la digestión del almidón. La modificación de las condiciones del procesado puede ser una forma de cambiar la estructura de la pasta y mejorar o deteriorar sus propiedades nutricionales (Petitot et al., 2009a). Por ejemplo, se demostró que la aplicación de altas temperaturas durante el secado de la pasta de trigo duro induce la formación de una fuerte red de proteínas (De Zorzi et al., 2007; Duszkieviczreinhard et al., 1988; Lamacchia et al., 2007; Petitot et al., 2009b) que conduce a una disminución de la digestibilidad in vitro del almidón (Casiraghi et al., 1992). Pero, por otro lado, también se demostró que reduce la digestibilidad de las

proteínas y aumenta su potencial alergenicidad (De Zorzi et al., 2007; Petitot et al., 2009b).

2.3.3.2 Almidón resistente

El almidón resistente es un compuesto bioactivo definido como aquellos almidones que por localización, causas físicas o químicas, no están disponibles para el ataque enzimático y por tanto pueden actuar como fibra en nuestro organismo (Arp et al., 2021). Englyst et al. (1992) definió almidón resistente como la fracción del almidón que no es digerido por el intestino delgado y que se fermenta en el intestino grueso.

Uno de los métodos más utilizados para clasificar el almidón basado en la cinética de la digestión in vitro es el sugerido por Englyst et al. (1992). El método se basa en la digestión in vitro de almidón simulando las condiciones del estómago e intestinales y midiendo la liberación de glucosa en diferentes momentos (Lehmann y Robin, 2007; Singh et al., 2010). Según el método, las diferentes fracciones de almidón se definen como (Camelo-Mendez et al., 2016):

- Almidón de digestión rápida: relacionado con la cantidad de glucosa liberada después de 20 min, en la boca y la primera parte del intestino delgado.
- Almidón de digestión lenta: relacionado con la cantidad de glucosa liberada entre 20 y 120 min de digestión in vitro, en el intestino delgado.
- Almidón resistente (AR): almidón total menos la cantidad de glucosa liberada dentro de los 120 min de la digestión in vitro. No en el intestino delgado, acción principal en el colon.

En primer lugar, el almidón resistente fue clasificado en 3 tipos por Englyst et al. (1992), pero hoy en día se reconocen 5 tipos. Los tipos 1 (AR1) y 2 (AR2) están presentes de forma natural en muchos alimentos. El AR1 se encuentra en legumbres y cereales (cereales integrales sin procesar) y es el almidón resistente físicamente inaccesible. Se demostró que la estructura de la pared de las células del endospermo de cereales o cotiledones de leguminosas y su integridad desempeñan un papel clave en la velocidad y el alcance de la hidrólisis del almidón presente dentro de las células (Bhattarai et al., 2018; Dhital et al., 2016). Además, algunos estudios han concluido que algunos compuestos presentes de forma natural, como los taninos y otras sustancias fenólicas, aumentan el AR

en los granos (Barros et al., 2012; Mkandawire et al., 2013). AR2 es el almidón que por su conformación física no es susceptible a la acción de enzimas, como la el presente en tubérculos, plátanos verdes y variedades de maíz con alto contenido de amilosa, pertenecientes a los tipos cristalinos B o C. AR3 es el almidón resistente obtenido por gelatinización seguida de un enfriamiento en el que se produce la recristalización de amilosa y amilopectina (retrogradación), que puede ser inducida por tratamientos especiales (ciclos de calentamiento/enfriamiento o congelación/descongelación) y/o almacenamiento, lo que afecta a la textura y los atributos nutricionales de los alimentos (Kong y Singh, 2016). Este tipo de AR se ha asociado particularmente con la amilosa retrogradada, ya que las cadenas lineales que forman estructuras de doble hélice pueden alinearse después de la gelatinización, lo que conduce a la inaccesibilidad de los enlaces glucosídicos a las enzimas (Zhang et al., 2013). Así, AR3 está directamente relacionado con las características del almidón, como el contenido de amilosa y el grado de polimerización (Luckett y Wang, 2012). AR4 es el tipo que se obtiene mediante una modificación química que le confiere resistencia enzimática. Entre las reacciones más comúnmente aplicadas, se pueden mencionar acetilación, metilación, fosforilación, esterificación con OSA (anhídrido octénil succínico) y reticulación. Además, la conjugación entre almidón y otros polisacáridos como la pectina puede dar lugar a almidones resistentes (Zhang et al., 2014). Las modificaciones químicas también pueden modificar las propiedades tecno-funcionales de los almidones, como el comportamiento reológico de la pasta (propiedades de “pasting”) (Krolikowska et al., 2019). La quinta categoría (AR5) es el complejo de almidón-lípidos. Su resistencia a la hidrólisis enzimática es mayor cuando son complejos cristalinos y cuando los ácidos grasos tienen cadenas más largas (Hasjim et al., 2013; Hasjim et al., 2010). Así, surge un amplio espectro de posibilidades al tener que seleccionar almidones resistentes para enriquecer el alimento con fibra.

Varios factores influyen en el contenido de AR en un alimento. Además de la variación natural provocada por la diversidad de fuentes, los diferentes tratamientos térmicos realizados sobre el alimento influyen en los valores finales de AR (Guzel y Sayar, 2012; Liu et al., 2020b). Los métodos de procesamiento también pueden producir variaciones con respecto al tipo de AR encontrado en el alimento. El almidón retrogradado (AR3) y los complejos de amilosa-lípido (AR5) pueden aparecer en el

producto final cocinado (Krongworakul et al., 2020). Además, otro factor que afecta la cinética de la digestibilidad es el proceso de molienda. El procesamiento en harina provoca el daño de la estructura de la pared celular, facilitando el ataque enzimático (Dhital et al., 2016); el tamaño de las partículas de la harina también es un factor de influencia (Mahasukhonthachat et al., 2010). Además, el método de conservación puede conducir a una disminución del contenido de AR, como se observa por ejemplo durante el secado (Khoozani et al., 2019), o a un aumento de AR como en el caso del almacenamiento en frío, relacionado con la retrogradación del almidón en muchos alimentos (Rojas-Molina et al., 2020).

Los efectos beneficiosos del AR en la salud humana están relacionados principalmente con su papel como fibra dietética, la capacidad de modular la glucemia, la colesterolemia y la homeostasis de la microbiota intestinal, la prevención del cáncer de colon y enfermedades metabólicas como la diabetes mellitus tipo 2 o el síndrome metabólico, para evitar complicaciones en pacientes diabéticos, para mejorar el sistema inmunológico, y contribuir a la reducción de la obesidad y del peso corporal (Arp et al., 2021).

La retrogradación del almidón es deseable en términos de importancia nutricional por su relación con el AR tipo 3, debido a la digestión enzimática más lenta del almidón retrogradado y a la liberación moderada de glucosa en el torrente sanguíneo (Copeland et al., 2009; Wang y Copeland, 2013). La retrogradación del almidón se ve afectada por la temperatura de almacenamiento y la composición de los alimentos, como el contenido de agua, azúcares, lípidos, sales y enzimas antienviejecimiento. Por otra parte, el uso de almidones cerosos con bajo contenido en amilosa puede disminuir el nivel de retrogradación (Singh y Anderson, 2004). En el caso de la pasta cocida, durante su enfriamiento se inicia la retrogradación del almidón que comienza desde la superficie y progresa hacia el interior (Heneen y Brismar, 2003). Riva et al. (2000) comprobó que se producía una menor retrogradación en pasta cuando el producto se almacena a temperatura ambiente, evitando el intercambio de humedad dentro de las bolsas cerradas, que en el frigorífico (como suele observarse en la práctica de hostelería).

Se sabe que el método de cocción influye significativamente en la digestión del almidón (Tamura et al., 2021). El calentamiento de alimentos que contienen almidón

puede provocar diferentes cambios en la estructura cristalina y la resistencia de los almidones. Los diferentes métodos de procesamiento de alimentos afectan la velocidad de digestión del almidón principalmente en aquellas condiciones que producen una hidratación evidente de los gránulos (gelatinización). Aumenta la disponibilidad del almidón para las amilasas cuando se produce la hidratación este durante el tratamiento térmico (Bjorck et al., 1994). Las diferencias en la repuesta glucémica en comidas ricas en carbohidratos pueden deberse principalmente al cocinero (Gelencser et al., 2010). En el trabajo de Brand et al. (1985) concluyeron que los alimentos que han sido más procesados tienen un mayor contenido en almidón digerible que los cocinados convencionalmente, produciendo un índice glucémico más alto y Gelencser et al. (2010) obtuvieron una menor digestibilidad en muestras de pasta crudas frente a la pasta cocida. Li et al. (2014) vieron que la cocción con microondas conduce a una mayor digestibilidad del almidón del arroz que el calentamiento por conducción, Reed et al. (2013) observaron que el arroz salteado mostró una menor hidrólisis del almidón en comparación con el arroz cocido a vapor y Guillen et al. (2018) concluyeron que la cocción a baja temperatura condujo a la reducción de la hidrólisis del almidón en equilibrio, la constante cinética y el índice glucémico estimado.

2.3.4 Estimación y predicción de los cambios en la pasta durante la cocción

Existe un interés creciente en el desarrollo de modelos matemáticos para describir los procesos involucrados en la producción y cocción de los alimentos (Erdogdu, 2005). La importancia de tener tales modelos disponibles esta relacionada con su capacidad para predecir estos procesos como una alternativa válida a las investigaciones empíricas (Cafieri et al., 2008).

Los primeros estudios sobre la relación entre las modificaciones físicas y químicas de la pasta y las variables del proceso de cocción se centraron en la medida del grado de gelatinización y su relación con la calidad de la pasta (Edwards et al., 1993; Shetty et al., 1974). El proceso de gelatinización del almidón se ha descrito mediante una cinética de primer orden, con una dependencia de la constante cinética con la temperatura de tipo Arrhenius (Lund y Lorenz, 1984). A pesar de la aparente simplicidad de esta cinética, fenomenológicamente la gelatinización es muy compleja (Atwell et al., 1988) e implica cambios significativos en las propiedades físicas, químicas y nutricionales de la pasta,

como por ejemplo, cambios en la difusividad, en las propiedades reológicas y en la forma de la pasta, motivados además por la relajación de la matriz proteínica y la absorción de agua, incrementándose la susceptibilidad a la digestión enzimática (Aguerre et al., 1989; Levine y Slade, 1988).

Además de la gelatinización del almidón, otro aspecto que ha sido profusamente analizado ha sido la hidratación de la pasta durante la cocción. Uno de los trabajos más destacados sobre la cinética de hidratación de la pasta es el de Del Nobile et al. (2003). Estos autores consideran que durante los primeros estadios de la hidratación, la pasta se calienta y se produce la transición vítrea. Sin embargo, debido al bajo contenido inicial de agua de la pasta y la cantidad depreciable de agua absorbida durante la transición, el grado de cristalinidad no cambia sustancialmente. Más tarde, cuando el agua penetra en la matriz se rebaja la temperatura de fusión de los cristales de almidón por debajo de la temperatura de ebullición del agua, lo que conduce a la fusión de los dominios ordenados de la pasta y a la reducción del grado de entrecruzamiento de la matriz macromolecular, lo que a su vez permite la penetración de una mayor cantidad de agua en la matriz lo que trae consigo la deformación y el ablandamiento de la pasta. La pasta continua absorbiendo agua hasta que se alcanza un estado de pseudoequilibrio antes de que comience la hidrólisis de los carbohidratos. Por lo tanto, se consideran cuatro fenómenos implicados en la hidratación de la pasta: la fusión del almidón en estado cristalino, la difusión de agua, la relajación de la matriz macromolecular proteica y la deformación residual. Se considera que la cinética de fusión de los cristales es generalmente muy rápida en comparación con la del fenómeno de difusión de agua y por lo tanto no controla el proceso. En cuanto a la difusión de agua, el coeficiente difusivo depende de la concentración local de agua y del grado de gelatinización del almidón. La cinética de relajación de la matriz macromolecular proteica esta relacionada con la velocidad a la que aumenta gradualmente la concentración de agua en los puntos frontera de la pasta y para describir este aumento se recurre a una ecuación empírica. La deformación es consecuencia de dos factores, por una parte interviene la hidratación aumentando la longitud y por otra la relajación de la macroestructura proteica que influye en sentido contrario. Del Nobile y Massera (2000) propusieron un modelo para describir también la cinética de absorción de agua durante la etapa de sobrecocción. El modelo propuesto se basa en el supuesto que la sobrecocción comienza una vez que desaparece el núcleo

central y que durante esta etapa la cinética de absorción de agua está gobernada por la velocidad de relajación de la matriz proteica. El tiempo de relajación evaluado cambia con la temperatura según una ecuación de tipo Arrhenius. Con lo que pudo apoyar la idea de que la relajación de la matriz es la principal responsable de los resultados de sobrecocción de la pasta. Según estos resultados, concluyó que se puede usar el tiempo de relajación de la matriz proteica como una medida objetiva de la velocidad a la que cambian las propiedades de la pasta una vez que se alcanzan las condiciones óptimas de cocción.

El modelo matemático de Del Nobile et al. (2003) predice durante el transcurso de la cocción la evolución del radio del núcleo interno del espagueti y el perfil de concentración de agua, obteniendo valores similares a los resultados experimentales. Pero este modelo tan complejo se aplicó solo a los espaguetis. Sin embargo, la pasta tiene una gran cantidad de formas y dimensiones, por lo que Cafieri et al. (2008) propusieron un modelo matemático más sencillo y flexible para que pudiera aplicarse a diferentes formas de pasta y predecir la cinética de hidratación durante la cocción y la etapa inicial de sobrecocción. El modelo desarrollado tuvo en consideración tres geometrías diferentes de pasta: lámina plana, cilindro macizo y cilindro hueco. Este modelo supone que la difusividad del agua depende solo del grado de gelatinización del almidón y que cambia de valor a partir de una cierta concentración de agua, que en los puntos frontera la concentración de agua varía linealmente con el tiempo, y que la pasta no cambia de volumen. La evolución de los perfiles de concentración de agua según lo predicho por el modelo muestra un comportamiento que es básicamente el mismo para las tres geometrías, con la diferencia en la rapidez de desaparición del núcleo no gelatinizado, es decir, el tiempo al que desaparece la región central no gelatinizada que depende de la forma de la pasta.

Otros modelos como el de Cunningham et al. (2007) proponen describir la absorción de agua durante la rehidratación de la pasta utilizando la segunda ley de difusión de Fick, pero para poder ajustar los datos experimentales al modelo se tuvieron que utilizar dos coeficientes difusivos y además el modelo es válido para temperaturas comprendidas entre 20 y 80 °C por lo que no cubre todas las condiciones de cocción.

Se han desarrollado otros modelos empíricos como la ecuación de Peleg y la función de distribución de Weibull para la predicción y optimización de la cinética de rehidratación de diferentes alimentos (Djomdi et al., 2007). Peleg (1988) propuso una ecuación no exponencial de dos parámetros para describir las curvas de sorción. El modelo ha sido ampliamente utilizado debido a su simplicidad y describe adecuadamente la hidratación de varios alimentos (AbuGhannam y McKenna, 1997; Maskan, 2001). La función de distribución de Weibull describe el proceso de rehidratación como una serie de eventos probabilísticos y también ha sido utilizada para varios alimentos (García-Pascual et al., 2006; Machado et al., 1999; Ruíz Díaz et al., 2003). Cunningham et al. (2007) concluyó que la ecuación de Peleg describe la absorción de agua de la pasta entre 20 y 80 °C, y que la función de distribución de Weibull modela adecuadamente la rehidratación de la pasta, pero no tiene en cuenta ni cambios estructurales en la pasta ni la gelatinización del almidón.

Durante la cocción, la pasta experimenta cambios estructurales que numerosos estudios han cuantificado a partir de medidas de propiedades mecánicas y dinámico-mecánicas e intentado correlacionar con las características de la pasta de partida y con las condiciones de cocción (Edwards et al., 1993; Gonzalez et al., 2004; Liu et al., 1997). Así, algunos estudios como el de Cuq et al. (2003) se centran en la etapa de deshidratación de la pasta fresca y relacionaron los cambios en las propiedades mecánicas de la pasta con el contenido decreciente de agua y la temperatura. Sin embargo, otros modelos como los de Chillo et al. (2008) y Cocci et al. (2008) se centraron en la relación entre parámetros mecánicos y las condiciones de cocción. En particular, Chillo et al. (2008) propusieron un modelo empírico que relaciona la evolución de la longitud de los espaguetis durante la cocción, el cambio del módulo elástico en función del tiempo de cocción y la susceptibilidad a la rotura de los espaguetis secos. Cafieri et al. (2010) desarrollaron un modelo matemático capaz de predecir el comportamiento mecánico de diferentes tipos de espaguetis cocidos en diferentes momentos (antes y después del tiempo óptimo de cocción). En particular, el comportamiento mecánico se describió a través de los cambios que se producen en el módulo elástico y la resistencia a la tracción. El comportamiento mecánico del espagueti se ajustó al de un material compuesto por cilindros coaxiales, cada uno de los cuales tiene un módulo elástico específico, que depende en gran medida

de la concentración local de agua. El modelo fue validado para tres muestras de pasta de sémola y tres muestras de pasta no convencional.

2.4 CAMBIOS EN LOS VEGETALES DURANTE EL COCINADO

2.4.1 Cambio en la textura de los vegetales durante el cocinado

2.4.1.1 Estructura de los vegetales

La textura de los productos hortofrutícolas depende de su estructura celular (Wills et al., 1998). Las células están limitadas por una membrana semipermeable denominada plasmalema que a su vez está rodeada por una pared celular (Figura II- 23). La pared celular es una unidad polimérica heterogénea y dinámica que consta de una estructura fibrosa de celulosa incrustada en una matriz compleja de pectina, hemicelulosa, proteínas estructurales y algunos compuestos fenólicos. La pared está muy hidratada (~65% de agua) y contiene varios solutos disueltos, iones y proteínas solubles, incluidas enzimas (Sila et al., 2008). La pectina es un polisacárido aniónico ramificado, y se considera el polímero más significativo de la pared celular debido a su abundancia, su solubilidad y su sensibilidad a las reacciones químicas, de forma que juega un papel fundamental en la determinación de los atributos de calidad de muchos productos vegetales (Liu et al., 2020a). Las pectinas entrelazan las paredes de las células adyacentes formando una red denominada lamela central. Las principales funciones de la pared celular son reforzar el plasmalema frente a la presión hidrostática del contenido celular y proporcionar soporte estructural a la célula y los tejidos vegetales. Las células adyacentes se comunican a través de pequeños canales, denominados plasmodesmos, que unen sus masas citoplasmáticas. Dentro del espacio confinado por el plasmalema, se encuentra el citoplasma y una o más vacuolas. Las vacuolas son depósitos fluidos, que contiene varios solutos, como azúcares, ácidos orgánicos, aminoácidos y sales y que se hallan rodeados por una membrana semipermeable, el tonoplasto. El tonoplasto y el plasmalema, son los responsables del mantenimiento de la presión hidrostática de la célula, permitiendo el paso del agua, pero restringiendo el de los solutos y las macromoléculas. La textura de los alimentos vegetales se puede por tanto atribuir principalmente a la pared celular primaria, a la lamela central y a la turgencia generada dentro de las células por ósmosis (Terefe y Verseege, 2011).

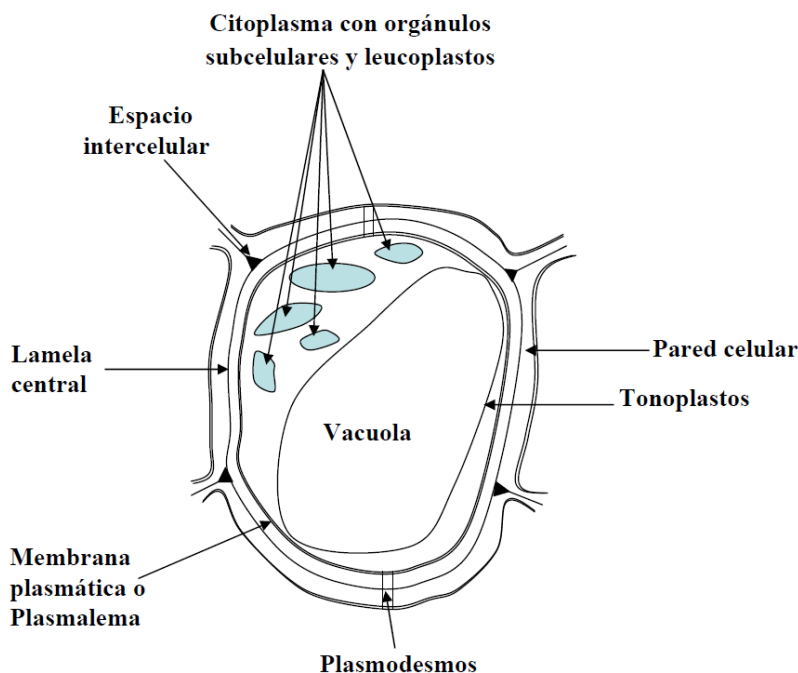


Figura II- 23. Célula vegetal y sus orgánulos (Terefe y Verseeq, 2011).

2.4.1.2 Cambios estructurales de los vegetales durante el cocinado

Durante el calentamiento de frutas y verduras, la turgencia y la integridad de la membrana se pierden rápidamente y ocurren cambios estructurales en los polisacáridos de la pared celular que afectan a la textura. El tratamiento térmico provoca una pérdida inicial de firmeza debido a la ruptura de la membrana celular, que conduce al libre movimiento de solutos y agua dentro y fuera de la célula, lo que ocasiona la pérdida de la turgencia. Este proceso de ablandamiento inicial se intensifica por la disolución de la pared celular y de la lamela central, con lo que aumenta la facilidad de la separación celular. La expulsión del aire atrapado en el espacio intercelular también puede afectar a la textura de aquellos productos con amplio espacio intercelular. El gas representa una parte sustancial del volumen de los tejidos vegetales frescos y durante el tratamiento térmico puede influir significativamente en la textura del vegetal (Dobiáš et al., 2006).

La mayoría de los cambios observados en los alimentos de origen vegetal procesados térmicamente se atribuyen a transformaciones en la estructura y composición de la pectina. Estos cambios están fuertemente influenciados por las propiedades de la materia prima y las etapas y condiciones de (pre)procesamiento (Sila et al., 2008). Como consecuencia de la rotura de las paredes celulares, se produce una disolución de la red de pectinas de la lamela central de las células y el consiguiente ablandamiento del tejido por

pérdida de la adhesión celular. La rotura se inicia normalmente en la superficie de la célula y se abre paso hasta la lamela central. La ruptura de la lamela central podría producirse por ruptura de los puentes de hidrógeno en las pectinas y en otros polisacáridos de la pared celular (Sila et al., 2006). La fuerza de adhesión celular es dependiente en gran medida de las interacciones en la lámina media adyacente a los espacios intercelulares. El máximo ablandamiento sólo se produce cuando se han roto estas interacciones.

Generalmente, los cambios en la estructura y composición de la pectina pueden surgir de reacciones enzimáticas y/o no enzimáticas. Las principales enzimas degradadoras de la pectina son la pectinmetilesterasa (PME), la poligalacturonasa (PG) y la pectato liasa (PL) (Willats et al., 2006). Existen numeras reacciones de conversión de la pectina, pero aquellas más importantes en las que interviene el componente homogalacturonano (HG) se muestran en la Figura II- 24.

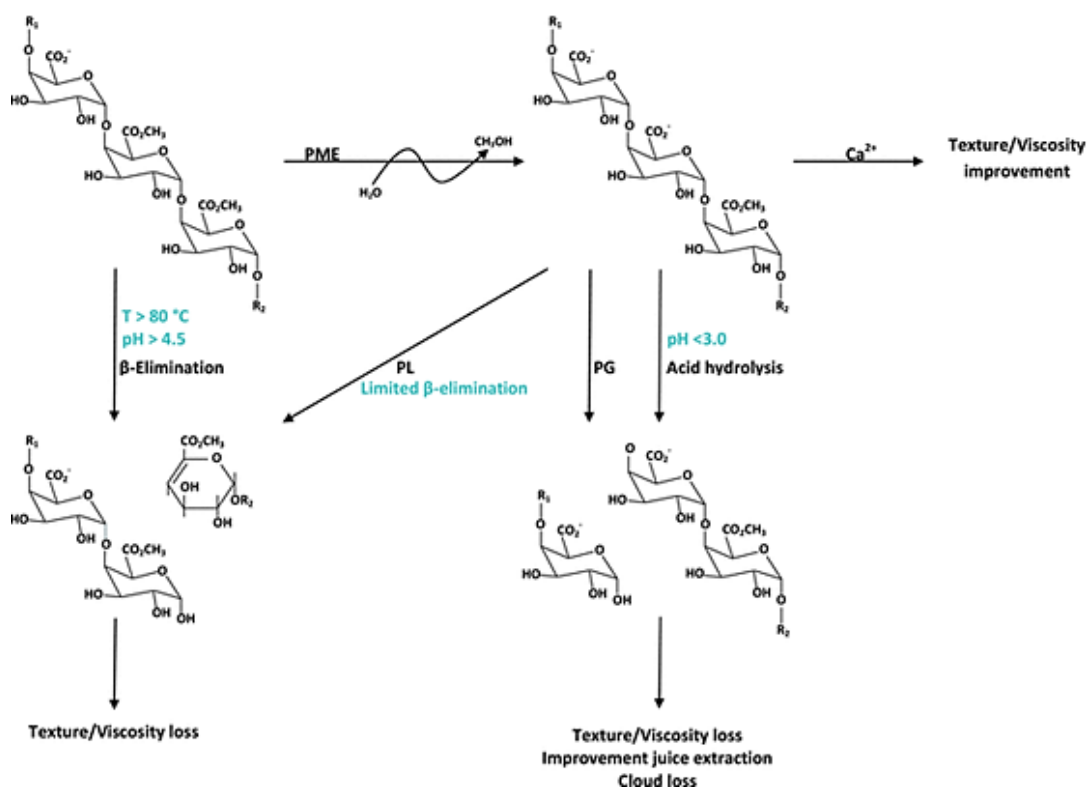


Figura II- 24. Representación esquemática de las posibles reacciones de conversión de la pectina (HG). (PME=polimetilesterasa, PG: poligalacturonasa, PL:pectato liasa, OME:metoxilo, R1/R2: fragmento inicial/final del polímero de peptina).Adaptado de Sila et al. (2009).

La PME cataliza la desmetoxilación de la pectina, lo que da como resultado la formación de pectina carboxilada con liberación de metanol. La molécula de pectina desmetoxilada puede (i) entrecruzarse con iones divalentes como calcio formando ensamblajes supramoleculares y/o geles originando un efecto reafirmante, o (ii) puede ser un sustrato para las enzimas de despolimerización, lo que conlleva un ablandamiento del producto. Las enzimas de despolimerización incluyen hidrolasas como la PG y liasas como la PL. Las hidrolasas escinden los enlaces glucosídicos mediante reacciones de hidrólisis ácido/base, mientras que las liasas fragmentan los polímeros a través de una reacción de β -eliminación que origina la formación de un doble enlace entre C-4 y C-5 en el extremo no reductor recién formado, (Sila et al., 2009).

La PME es una enzima presente en la mayoría de los tejidos vegetales, que se vuelve activa por calentamiento a 50-70 °C, o cuando el tejido se daña por magulladuras o congelación. A temperaturas superiores a 70 °C, la PME se inactiva rápidamente, debido probablemente a la formación de un entrecruzamiento adicional por cationes divalentes Ca^{2+} y Mg^{2+} que aparecen como consecuencia de una descompartimentalización dentro de las células durante el calentamiento, o se disocian de las moléculas de almidón gelatinizado (Moledina et al., 1981). Estos hechos sugieren que el escaldado a baja temperatura aumenta la actividad PME del tejido, siendo éste uno de los factores que afecta la calidad textural del producto final.

La pectina es muy estable a pH próximo a 3,5. Sin embargo, existen diversas reacciones que pueden producir su degradación no enzimática. La más importante es la fragmentación catalítica básica de las cadenas de pectina a través de la reacción de β -eliminación, un proceso que ocurre en paralelo con la desesterificación, y que tiene lugar incluso cuando la pectina se calienta a pH neutro o débilmente ácido. La mayoría de los vegetales tiene un pH por encima de 4,5 y cuando se procesan a temperaturas superiores a 80°C o más altas, la pectina es muy susceptible de sufrir reacciones de β -eliminación (Sila et al., 2005). El segundo mecanismo que conduce a la degradación de la pectina durante el procesamiento térmico es la hidrólisis ácida que tiene lugar a $\text{pH} \leq 3,5$. Bajo estas condiciones, que no son habituales durante el manejo y procesamiento de los vegetales, la pectina con bajo grado de metoxilación se despolimeriza más rápido que la de alto grado de metoxilación. Además, la pectina se puede degradar a través de la escisión mediante radicales hidroxilo, mecanismo de ablandamiento que predomina durante la

postcosecha. Durante el procesamiento térmico, la pectina sufre cambios en el grado de polimerización debido a la reacción de β -eliminación. Esta reacción se ve favorecida por un alto contenido de grupos metoxilo, el aumento de la temperatura y del pH, y por la presencia de sales monovalentes (Fraeye et al., 2007).

La captación o adsorción de agua por los polisacáridos de la pared celular que tiene lugar durante la cocción puede reducir la cohesión de la matriz, ablandar la pared celular y disminuir la adhesión intercelular. La composición de la matriz puede influir en el grado de hidratación; de hecho, se ha sugerido que un alto grado de metoxilación de la pectina de la pared celular aumentaría la absorción de agua (Warren y Woodman, 1974).

Cuando el procesamiento térmico produce un grado indeseable de ablandamiento, a menudo se agregan sales de calcio antes de cocinar para mejorar la textura. Para propósitos prácticos, la cantidad de sal de calcio añadida rara vez supera el 0,1% del peso de la fruta o verdura para evitar sabores desagradables (Doesburg, 1965).

La variación en el tratamiento de cocción puede afectar profundamente tanto la textura como el valor nutricional de las verduras. Muchos estudios han revelado que la mayoría de las verduras precocinadas a una temperatura moderada de 50 a 80 °C durante un período de tiempo adecuado y posteriormente cocidas en agua hirviendo mostraron una mayor firmeza que las cocidas directamente sin precocción (Chang y Chang, 1992; Chang et al., 1995; Wu y Chang, 1990). Este efecto reafirmante de la precocción se ha atribuido a la acción de la PME sobre los materiales de la pared celular, en particular las sustancias pécticas, que dan como resultado la desesterificación de las moléculas de pectina y la posterior formación de puentes de calcio entre los grupos carboxilo libres de las moléculas de pectina adyacentes (Bartlome y Hoff, 1972; Chang y Chang, 1992; Hoogzand y Doesburg, 1961; Lee et al., 1979; Lin y Chang, 2005). Esta forma de procesamiento puede tener una aplicación limitada en productos con una alta actividad de la poligalacturonasa, ya que la baja temperatura en el escaldado puede activar esta enzima y ocasionar una degradación enzimática de la pectina (Anthon y Barrett, 2002; Lopez et al., 1997).

2.4.2 Cambios del color de los vegetales durante el cocinado

En las frutas y hortalizas, el color se debe principalmente a cuatro familias de pigmentos: dos liposolubles, clorofilas (coloración verde) y carotenoides (coloración

amarilla-naranja-roja), y dos hidrosolubles, betalaínas (coloración roja) y antocianos (coloración roja-azul-morada) (Sharma et al., 2021). A continuación, se detalla cómo afecta el tratamiento térmico en la clorofila, que es el compuesto químico responsable del color de los vegetales verdes.

2.4.2.1 Cambios en la clorofila

La clorofila es el pigmento más abundante existente en el sistema fotosintético de las plantas terrestres y las algas, es un pigmento indispensable para absorber la energía luminosa y transferir electrones durante la fotosíntesis (Hu et al., 2021). La clorofila, que se encuentra en los vegetales verdes, es de dos tipos (Figura II- 25): clorofila *a* y clorofila *b* en una proporción aproximadamente de 3:1 (Fennema et al., 2010). Estructuralmente, la única diferencia entre las dos se produce en la posición C-7, donde en la clorofila *a* está presente el grupo metilo (-CH₃) mientras que en la clorofila *b* está presente el grupo aldehído (-CHO). La diferencia en la estructura conduce a diferentes colores de clorofilas: azul verdoso (clorofila *a*) o amarillo verdoso (clorofila *b*) (Sharma et al., 2021). Además, también se diferencian en cuanto a su estabilidad térmica, ya que la clorofila *a* es térmicamente menos estable que la clorofila *b* (Steet y Tong, 1996).

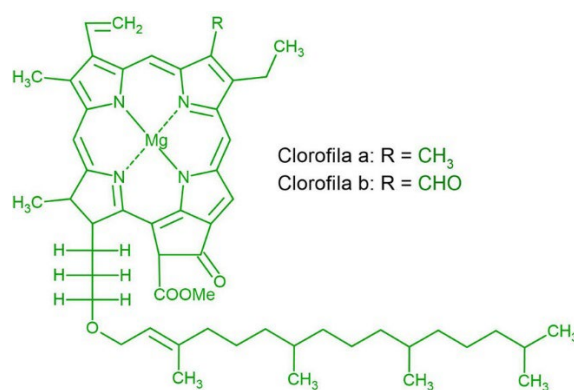


Figura II- 25. Estructura química de las clorofilas *a* y *b* (Brauer y Chan-Higuera, 2021).

El mantenimiento del tono verde característico de cada producto influye favorablemente en la calidad final de las verduras procesadas térmicamente, que obtienen su color como resultado de la clorofila. El procesamiento térmico de los vegetales verdes provoca una alteración en la clorofila que conlleva cambios de color, lo que en última instancia es percibido por el consumidor como una pérdida de calidad (Rudra et al., 2008). Se pueden clasificar en dos grupos los derivados de clorofila que se forman durante el

procesamiento térmico según la presencia o ausencia del átomo de magnesio en el anillo tetrapirrólico.

Cuando se expone la molécula de clorofila al calor el primer cambio que se produce es su isomerización. Después de calentar a 100 °C durante 10 minutos, se obtiene un grado de conversión del 5-10% de las clorofilas por isomerización. Una de las alteraciones que se puede producir en la molécula de clorofila es la pérdida del átomo de magnesio, resultando la formación de feofitina de color pardo-oliváceo. Esta pérdida del magnesio se produce por sustitución de dos átomos de hidrógeno. Al ser la clorofila b más termoestable que la clorofila a, la formación de las feofitinas se produce más rápidamente desde la clorofila a que desde la clorofila b. Este proceso es impulsado por la acidificación de los medios de cocción como consecuencia de la ruptura de las paredes celulares por el calor, lo que libera ácidos de los vegetales (Haisman y Clarke, 1975). El pH tiene influencia en la degradación de la clorofila de los vegetales verdes que son sometidos a tratamiento térmico. En los tejidos vegetales no dañados, las clorofilas se unen a las lipoproteínas y se protegen de los ácidos, pero, el calentamiento provoca la coagulación de estas proteínas y reduce su efecto protector (Manninen et al., 2015). En un medio ácido (pH 3,0) la clorofila es inestable frente al calor, mientras que un medio básico la clorofila es muy estable (pH 9,0). Se sabe que las sales de magnesio, calcio, sodio, amonio y algunos agentes tensioactivos tienen algún efecto estabilizador sobre la degradación de la clorofila (Eheart y Odland, 1973; Haisman y Clarke, 1975). Las sales tienen un efecto de protección electrostática que hace que se reduzca la degradación de la clorofila. La adición de cationes neutraliza la carga negativa superficial de los ácidos grasos y de las proteínas en la membrana del cloroplasto, reduciendo así la atracción de los hidrogeniones hacia la superficie de la membrana (Fennema et al., 2010).

Durante el calentamiento prolongado, las feofitinas se degradan aún más a pirofeofitinas a través de la descarbometoxilación. Las pirofeofitinas son los derivados de la clorofila formados por la eliminación del grupo carboximetilo de la posición C-10 de la estructura de las feofitinas por acción de la temperatura, ya que un aumento de la temperatura origina la descarboxilación de ese carbono. Las pirofeofitinas son los principales derivados de clorofila responsables del color verde-oliváceo de muchos vegetales enlatados (Fennema et al., 2010). De los diversos métodos de cocción, se descubrió que escaldar las verduras a baja temperatura (70 °C) da como resultado la

formación de epímeros de clorofila, feofitinas, clorofilidas y feoforbidas. Además, los tratamientos térmicos severos, favorecen la descarbometoxilación de las feofitinas para formar pirofeofitinas (Teng y Chen, 1999).

La clorofila también se puede degradar de forma enzimática, la clorofilasa es la única enzima conocida que cataliza la degradación de la clorofila. La clorofilasa cataliza la escisión del fitol de las clorofilas y de sus derivados carentes de magnesio. Si la escisión del fitol tiene lugar en la clorofila, se forma clorofilida. Sin embargo, si la reacción tiene lugar en la feofitina, se produce feoforbida. La temperatura óptima para la actividad clorofilasa varía entre 60 y 82,2 °C. La actividad enzimática disminuye cuando el tejido vegetal se calienta por encima de 80 °C, y la clorofilasa pierde su actividad en temperaturas superiores a 100 °C (Fennema et al., 2010). En la Figura II- 26 se muestra un esquema de las principales transformaciones de la clorofila que se han descrito.

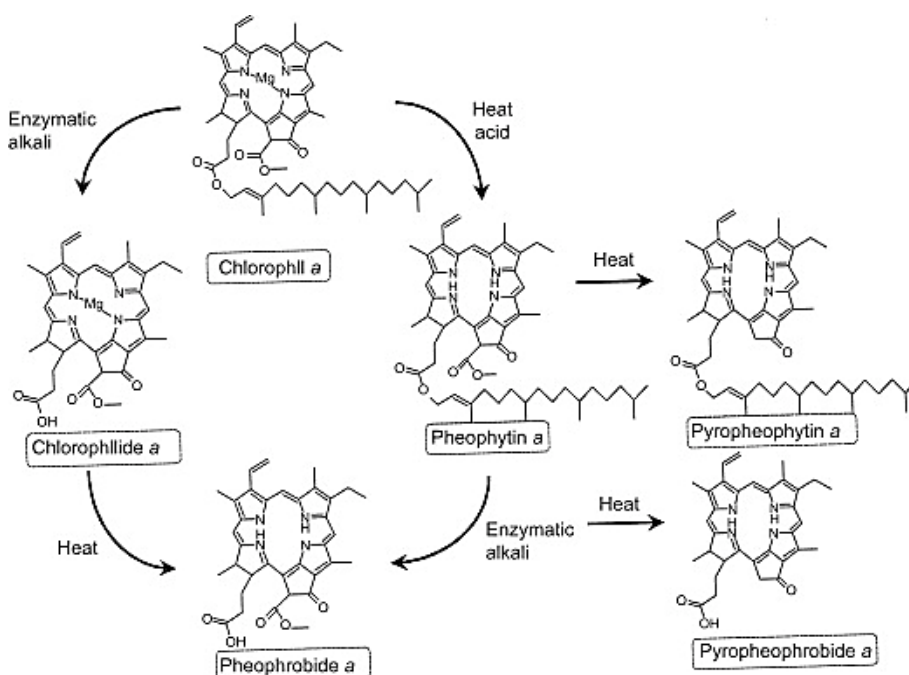


Figura II- 26. Principales transformaciones de la molécula de clorofila durante el procesamiento, almacenamiento o cocción de los alimentos (Roca et al., 2016).

2.4.3 Cambios de las propiedades nutricionales de los vegetales durante el cocinado

Cada vez se recomienda más una dieta rica en frutas y verduras, considerando que son fuentes de una amplia variedad de compuestos bioactivos que aportan efectos beneficiosos para la salud humana. Los compuestos bioactivos con capacidad

antioxidante retrasan la oxidación de otras moléculas al inhibir el inicio o la propagación de reacciones en cadena oxidantes por parte de los radicales libres y pueden reducir el daño oxidativo en el cuerpo humano (Namiki, 1990). Un grupo importante de compuestos bioactivos son los polifenoles, que comprenden más de 8000 sustancias ya identificadas. Se clasifican en clases según su estructura y se subcategorizan dentro de cada clase según el número y la posición del grupo hidroxilo y la presencia de otros sustituyentes. El grupo más extendido y diverso de polifenoles son los flavonoides que se construyen sobre el esqueleto de flavonas $C_6-C_3-C_6$. Además, en frutas y verduras se han identificado otros compuestos fenólicos como el ácido benzoico o derivados del ácido cinámico (Aherne y O'Brien, 2002). Las propiedades antioxidantes de los polifenoles se pueden atribuir a su capacidad para donar un átomo de hidrógeno del grupo hidroxilo aromático a un radical libre y/o a la capacidad de sus estructuras aromáticas para soportar un electrón desapareado (Nicoli et al., 1999). Su eficacia antioxidante depende de la estabilidad en diferentes sistemas, así como del número y ubicación de los grupos hidroxilo (Podsdek, 2007). Los compuestos fenólicos se producen como resultado del metabolismo secundario de las plantas y se encuentran frecuentemente unidos a azúcares (glucósidos), por lo tanto, tienden a ser solubles en agua (Ross y Kasum, 2002). Todo esto tiene como consecuencia que en los vegetales esté fuertemente relacionado el contenido en polifenoles con la actividad antioxidante (Murador et al., 2018).

Cuando las verduras se someten a diversos procesos de cocción, como hervido, cocción a presión, cocción con microondas, horneado, cocción a la plancha, fritura... aparecen variaciones en su actividad antioxidante o capacidad secuestrante. Estas variaciones dependen de muchos factores como: el propio vegetal (estructuras bioactivas), el método de cocción, la biodisponibilidad de fenoles (Sultana et al., 2008), la temperatura, la localización de las estructuras en los vegetales, el corte o picado del producto (Makris y Rossiter, 2001) y la estabilidad de la estructura al calor (Pedraza-Chaverri et al., 2006; Prasad et al., 1996). También influye el método de determinación empleado, ya que hay diversos métodos de extracción con disolventes y no existe un único método adecuado para la extracción de todas las clases de antioxidantes (Sreeramulu et al., 2013; Yamaguchi et al., 2001). Por ejemplo, operaciones como cortar o rebanar pueden inducir un rápido agotamiento enzimático de varios antioxidantes naturales como resultado de la alteración celular que permite el contacto de sustratos y enzimas

(Podsedek, 2007). Juárez et al. (2016) evaluaron el impacto de tratamientos térmicos de cocción (fritura en aceite de oliva, fritura en aceite de girasol y plancha) sobre la capacidad antioxidante y compuestos (poli)fenólicos de cebolla, pimiento verde y cardo. Todos los tratamientos térmicos tendieron a incrementar la concentración de compuestos fenólicos en los vegetales sugiriendo una destrucción térmica de las paredes celulares y compartimentos subcelulares durante el proceso de cocción que favorecen la liberación de estos compuestos. Pero observaron que las verduras a la plancha, debido a la mayor temperatura aplicada durante el tratamiento en comparación con la fritura, mostraron mayores cantidades de compuestos fenólicos. La ruptura de las estructuras vegetales podría facilitar la acción de las enzimas gastrointestinales y aumentar la biodisponibilidad de los compuestos polifenólicos. Sin embargo, Roy et al. (2007) comprobaron que las temperaturas normales de cocción afectaban negativamente el contenido de fenoles, así como a las actividades antirradicales y frenaba la proliferación celular del jugo de la mayoría de las verduras analizadas. Sin embargo, el calentamiento suave de los jugos de vegetales (50 °C, 10-30 min) conservó el 80-100 % del contenido fenólico y tanto la actividad antioxidante como la inhibición de la proliferación celular. Sugirieron que el grado de procesamiento térmico afecta no solo el contenido de compuestos fenólicos en los vegetales, sino también los efectos biológicos beneficiosos asociados con estos compuestos.

Cuando se comparan los métodos de cocción, la ebullición suele considerarse uno de los métodos en los que las verduras pierden la mayor cantidad de nutrientes (Baardseth et al., 2010; Bureau et al., 2015; Guillen et al., 2017), principalmente porque la temperatura y el tiempo de este método de cocción provocan la degradación térmica y la lixiviación de nutrientes como los fenoles (Vinha et al., 2015). La reducción del contenido de fenoles se produciría incluso si hirviesen por un tiempo muy corto, 1 min (Ismail et al., 2004). Los métodos de cocción que producen pocos cambios osmóticos conservan mejor estos compuestos como la cocción al vapor o en microondas (Pellegrini et al., 2010; Podsedek et al., 2008) o la cocción *sous-vide* en microondas (Gonnella et al., 2018). Zhong et al. (2015) estudiaron el efecto de la cocción al vapor con bolsas en el microondas frente a los métodos tradicionales de cocción sobre la conservación nutricional en el brócoli. Los resultados mostraron que el ácido ascórbico se retenía más en la cocción al vapor con bolsa en el microondas y se aumentaba la actividad antioxidante con respecto

a la cocción tradicional al vapor. Zhan et al. (2018) estudiaron los efectos de diferentes métodos de cocción (hervir, cocer al vapor, saltear, calentar en el microondas y hornear) y su duración sobre los antioxidantes y la capacidad antioxidante en brócoli. Con el salteado se obtenían los mayores contenidos en fenoles totales y en flavonoides con un aumento, respecto al producto crudo del 47,56 y el 67,93 %, respectivamente, seguido de la ebullición (con un aumento del 28,25 y el 44,93 %, respectivamente) y la cocción al vapor, mientras que la cocción por microondas y el horneado mostraron un efecto destructivo en la calidad del brócoli. Cocinar puede mejorar la disponibilidad de ciertos compuestos bioactivos (Ramos dos Reis et al., 2015). Esto se puede atribuir a una alteración de la membrana celular debido al procesamiento térmico que favorece la accesibilidad para la extracción de compuestos bioactivos, lo que también puede aumentar la capacidad antioxidante, ya que algunos de estos compuestos pueden transformarse en antioxidantes más fuertes que eliminan radicales a través de una reacción termoquímica y a través de la inactivación térmica de enzimas oxidativas (Jiménez-Monreal et al., 2009). Sin embargo, la mayoría de los estudios muestran una pérdida de la capacidad antioxidante durante la cocción, pero los resultados dependen de cada producto. Faller y Fialho (2009) evaluaron la capacidad antioxidante y el contenido de polifenoles de las verduras después de una cocción doméstica y concluyeron que en general, la cocción conducía a reducciones en la capacidad antioxidante de la mayoría de las verduras, con pequeñas diferencias entre los métodos de cocción aplicados. En el trabajo de Armesto et al. (2019) sugirieron que los diferentes métodos de cocción tienen diferentes efectos sobre los compuestos bioactivos de la col rizada, siendo la cocción a vapor el mejor método para preservar la capacidad antioxidante y los compuestos bioactivos, y que es importante la optimización de dichos métodos para minimizar las pérdidas de las propiedades nutricionales.

Los compuestos fenólicos son solubles en agua, por lo tanto, las técnicas de cocción que involucran agua generalmente conducen a pérdidas fenólicas por lixiviación. En el caso de la ebullición o cocción a presión se produce un fenómeno de lixiviación que puede ocasionar pérdidas del 64% en el contenido de carotenoides totales y del 49% en los fenoles totales (Bunea et al., 2008). Sin embargo, otros autores indican que las pérdidas de fenoles liberados al agua de cocción pueden ser de tal magnitud que su concentración se reduzca drásticamente hasta valores de un 90% o más según Barroga et

al. (1985); Rocha-Guzman et al. (2007). La concentración de ácidos fenólicos es más alta en las capas externas de algunos vegetales (Turkmen et al., 2005) y éstos están expuestos al agua (Andlauer et al., 2003) lo que reduce el poder antioxidante de algunos vegetales como los guisantes, las espinacas, la coliflor y el repollo (Sultana et al., 2008). Sin embargo, aunque los fenoles totales generalmente se almacenan en los vegetales en las redes de pectina o celulosa, y pueden liberarse durante el procesamiento térmico, los fenoles individuales a veces pueden aumentar porque el calor puede romper las estructuras supramoleculares, liberando los enlaces glucosídicos del azúcar fenólico (Bunea et al., 2008).

No existe un consenso en la literatura sobre la mejor manera de preparar los vegetales y conservar sus compuestos bioactivos (Murador et al., 2018). El efecto del procesamiento térmico puede depender de varios factores, como la técnica de cocción, el grado de calentamiento, la filtración en el medio de cocción, el solvente utilizado para la extracción, y el pH y el área de superficie expuesta al agua y al oxígeno (Wachtel-Galor et al., 2008). Además, cada matriz alimentaria contiene diferentes compuestos que son más o menos térmicamente lábiles; en consecuencia, una misma técnica de cocción puede implicar diferentes efectos, dependiendo de del vegetal (Bernhardt y Schlich, 2006). Burgos et al. (2013) investigaron el efecto de la ebullición sobre la actividad fenólica y antioxidante total en papas de pulpa morada y encontraron un aumento en el contenido de actividad fenólica y antioxidante total. Turkmen et al. (2005) también concluyeron que se produce un aumento durante el hervido del contenido en compuestos fenólicos totales en judías verdes, pimientos y brócoli. Ferracane et al. (2008) describe el mismo fenómeno en alcachofas escaldadas y sugiere como razón posible la más fácil extracción de los compuestos fenólicos en una matriz ablandada con respecto al producto y/o a la inactivación de la polifenol oxidasa, que podría ser responsable de la pérdida de fenoles en las plantas crudas. Por otro lado, Xu y Chang (2008) encontraron una disminución en el contenido fenólico total de la soya amarilla y la soya negra que fueron sometidas a ebullición, así como una disminución en la actividad antioxidante. Los resultados de Miglio et al. (2008) sugieren que para cada vegetal se podría seleccionar un método de cocción preferente para preservar o mejorar sus cualidades nutricionales y fisicoquímica.

2.4.4 Estimación y predicción de los cambios en los vegetales durante la cocción

Durante el procesado, las verduras se someten a muchas operaciones, como el escaldado, el enlatado, la esterilización y la congelación en las industrias alimentarias, así como la cocción a nivel doméstico, que es muy probable que afecten a la composición y al contenido de compuestos bioactivos debido a la degradación térmica, la dilución y la lixiviación en el agua utilizada para el tratamiento (Chuah et al., 2008; Goncalves et al., 2010; Jiménez-Monreal et al., 2009; Podsdek, 2007; Puuponen-Pimia et al., 2003). Las pérdidas de estos nutrientes deben tenerse en cuenta al desarrollar nuevos productos y/o procesos. Para predecir las pérdidas de nutrientes, el conocimiento de la cinética con la que éstas tienen lugar, incluido el orden de reacción, la constante de velocidad y la energía de activación, es muy importante, especialmente durante el procesamiento térmico. Los modelos cinéticos se utilizan para la evaluación y predicción de propiedades que determinan la calidad del producto, y además, se pueden emplear para conocer anticipadamente la influencia de determinados parámetros de procesado en las propiedades que son críticos para preservar la calidad del producto (Nambi et al., 2016).

Monalisa et al. (2020) evaluaron el efecto del tiempo de ebullición sobre las propiedades fisicoquímicas, compuestos bioactivos, actividad antioxidante, color y textura de la calabaza y realizaron un estudio cinético. El estudio reveló que un modelo cinético de primer orden es adecuado para predecir los cambios que ocurren en los compuestos bioactivos, la actividad antioxidante, los parámetros de color (L^* , a^* , b^* , Croma) y la firmeza. Similares resultados obtuvieron Nambi et al. (2016) en su estudio cinético para cuantificar las pérdidas que se producen en los componentes bioactivos, la actividad antioxidante y los cambios de color y firmeza de cuatro vegetales de uso común (remolacha, guisante, berenjena y pimiento verde) durante el tratamiento térmico (70-90 °C). El estudio reveló además que un modelo basado en la función logística puede predecir la variación en los componentes bioactivos y la actividad antioxidante con mayor coeficiente de determinación (R^2) y menor error cuadrático medio (RMSE) en comparación con el modelo de primer orden, debido a la reducción logarítmica de estas propiedades al comienzo del proceso. Sin embargo, se encontró que los modelos cinéticos de orden cero y de primer orden son adecuados para predecir los cambios que se producen durante el escaldado en el color y la firmeza, respectivamente. En el trabajo de Giambanelli et al. (2016) estudiaron la degradación cinética de los compuestos

fitoquímicos en coles durante su cocinado. Las pérdidas en el contenido fenólico en las hojas de col durante el hervido siguieron una cinética de degradación de segundo orden, y detectaron altas cantidades de compuestos fenólicos en el agua de cocción debido a la lixiviación.

En la literatura hay gran cantidad de estudios de la degradación térmica en los vegetales (Managa et al., 2019; Monalisa et al., 2020; Nambi et al., 2016; Shamsudin et al., 2021), pero solo hay unos pocos sobre la cinética de lisis y lixiviación y la degradación térmica de compuestos fenólicos en el agua de cocción. En este sentido destacan los trabajos sobre la pérdida de glucosinolatos en el agua de cocción durante el procesamiento de vegetales de la familia *Brassica* (Hanschen et al., 2018; Sarvan et al., 2012; Sarvan et al., 2014) y la cinética de lisis/lixiviación y degradación térmica en mango y piña enlatada (Arampath y Dekker, 2021). Hanschen et al. (2018) y Arampath y Dekker (2021) describieron la lisis celular mediante un modelo cinético de primer orden, basándose en el anteriormente descrito por Sarvan et al. (2012). Sarvan et al. (2012) desarrollaron un modelo matemático dinámico que incluye los mecanismos responsables de los cambios en los glucosinolatos (lisis de células y compartimentos vegetales, difusión y lixiviación en el agua de cocción, hidrólisis enzimática, inactivación de la enzima mirosinasa y degradación térmica) y el efecto de la temperatura sobre ellos. En el modelo, describen todos los mecanismos responsables de los cambios en los glucosinolatos como una ecuación de primer orden a excepción de la hidrólisis por la enzima mirosinasa que se describe mediante la ecuación de Michaelis-Menten. Como la lisis, la lixiviación, la degradación térmica, así como la hidrólisis enzimática por mirosinasa, son reacciones dependientes de la temperatura. La dependencia de la temperatura de todas las constantes de velocidad de reacción se describe mediante una ecuación tipo Arrhenius. En el trabajo de Sarvan et al. (2012), la lixiviación del contenido celular se determinó mediante la medida de la conductividad en el agua de cocción después de diferentes tratamientos de tiempo/temperatura de la col roja picada, siguiendo el método de Verkerk (2002). Se encontró que la conductividad eléctrica del agua de cocción aumenta al incrementarse el daño celular y la lixiviación del contenido celular en el agua. Ser capaz de medir el grado de lisis celular de manera simple y rápida permite evaluar qué porcentaje de células vegetales deben romperse para lograr las condiciones óptimas para la hidrólisis de glucosinolatos.

Arampath y Dekker (2021) utilizaron un balance de masas para relacionar la fracción de células lisadas con la fracción de células intactas. Según este modelo, la lixiviación de componentes solubles en agua es una consecuencia directa de la lisis celular. El contenido de las células lisadas se añade a la fase de agua libre. Para describir matemáticamente este proceso, hay que tener en cuenta la cantidad de componentes de las células lisadas así como el efecto diluyente provocado por el aumento de la masa de agua libre provocada por esta lisis. Las constantes de velocidad para la lixiviación y la degradación dependen de la temperatura. Este hecho lo describieron mediante una ecuación de Arrhenius modificada, que determina la constante de velocidad relativa a una temperatura de referencia. La modelización es valiosa para la optimización y retención de estos compuestos fitoquímicos bioactivos a través del diseño de procesos aplicables. Estos modelos abren la posibilidad de hacer un seguimiento indirecto de los cambios nutricionales durante la cocción por lixiviación mediante medidas como habituales y escasamente exploradas como es la conductividad eléctrica del agua de cocción.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL



3.1 EQUIPOS DE COCCIÓN

3.1.1 Placas de inducción

Para el cocinado de los alimentos en esta tesis doctoral se han utilizado placas de inducción. En la cocción por inducción el calentamiento se produce gracias a que un alternador eléctrico suministra una corriente de alta frecuencia a una bobina plana, generándose una densidad de corriente dentro de la base del recipiente de cocción siempre que éste sea de material ferromagnético. Esta corriente se disipa debido al efecto Joule y genera una distribución de densidad de potencia volumétrica que calienta el material.

Las placas de inducción utilizadas fueron la placa Bosch Schott Ceran PIB375FB1E (BSH, Munich, Alemania) (Figura III- 1-a), dotada de dos zonas de cocción de 21 y 15 cm, y con la que se pueden seleccionar 17 niveles de potencia; y la placa Bosch Schott Ceran PXY675DW4E/01 (BSH, Munich, Alemania) (Figura III- 1-b) que dispone de zonas de cocción flexibles lo que permite cocinar con mayor variedad de recipientes, tanto en forma como en tamaño. Se puede trabajar como una única superficie de cocción grande a un nivel de potencia o bien dividir la zona, y cocinar como dos zonas independientes en cuanto a nivel de potencia. En ambos casos se pueden seleccionar 18 niveles de potencia. Además, está dotada de un sistema de control de temperatura denominado comercialmente como “frying sensor”. A tal fin, la placa dispone de un sensor situado sobre la bobina para medir la temperatura de la superficie vitrocerámica; por lo tanto, se mide la temperatura debajo de la sartén. El calor que se produce depende mucho de las propiedades magnéticas de la sartén y de la nivelada que esté su base, por lo que el sistema de control dispone de observadores adaptativos, cuyos parámetros pueden ajustarse en línea. De esta forma el control de temperatura no depende del tipo de sartén ni de la cantidad de alimento a cocinar. La relación entre la temperatura de la sartén y la potencia suministrada se establece mediante un modelo matemático usado en ingeniería de control consistente en una representación de espacio de estado. La potencia suministrada se calcula a partir del alternador usado y la temperatura de la sartén se estima a partir de la temperatura medida por el sensor. El usuario en el panel de mandos puede seleccionar 5 niveles de temperatura. Cada uno de estos niveles tiene asignado una temperatura de consigna que se muestran en la Tabla III- 1.

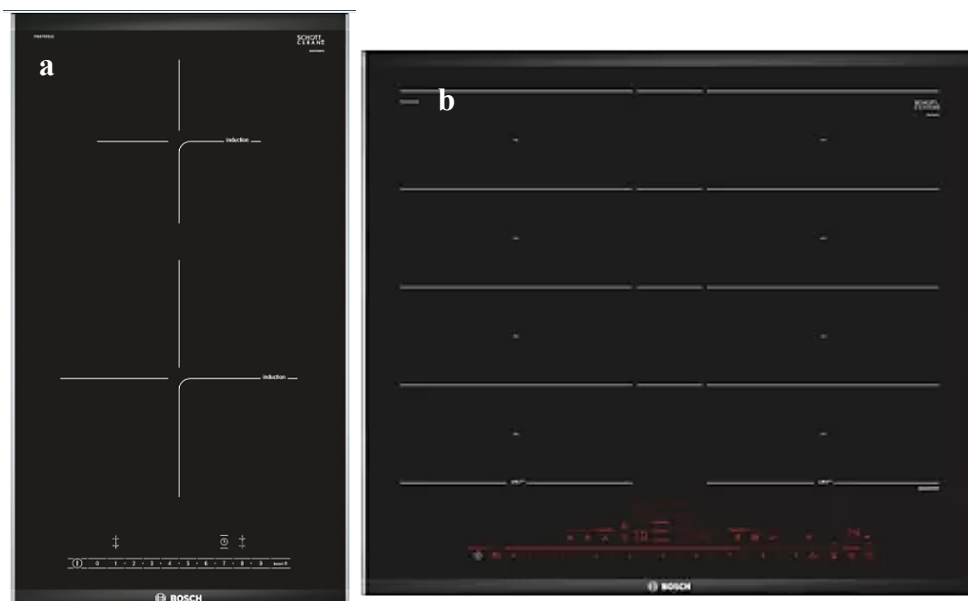


Figura III- 1. Placas de inducción: a) modelo Bosch Schott Ceran PIB375FB1E, b) modelo Bosch Schott Ceran PXY675DW4E/01 con control de temperatura.

Tabla III- 1. Niveles de temperatura para el cocinado con control de temperatura.

Nivel	T objetivo (°C)
1	120
2	140
3	160
4	180
5	215

3.1.2 Ensayos para caracterizar las placas de inducción

La caracterización de ambas placas de inducción consistió en calcular la velocidad de evaporación del agua para los diferentes niveles de potencia. Para ello se realizaron ensayos donde se registró la evolución de la pérdida de peso durante la ebullición de 2 L de agua contenida en una olla Oumbärlig (4 L de capacidad, 13 cm de alto, 20 cm de diámetro Ikea, Delft, Holanda) sin tapa para diferentes potencias durante 1200 s (Figura III- 2). Posteriormente, a partir de la pendiente de la recta que representa la pérdida de peso frente al tiempo se obtuvieron las velocidades de evaporación que se muestran en la Tabla III- 2 junto con las potencias suministradas en cada nivel para ambas placas.

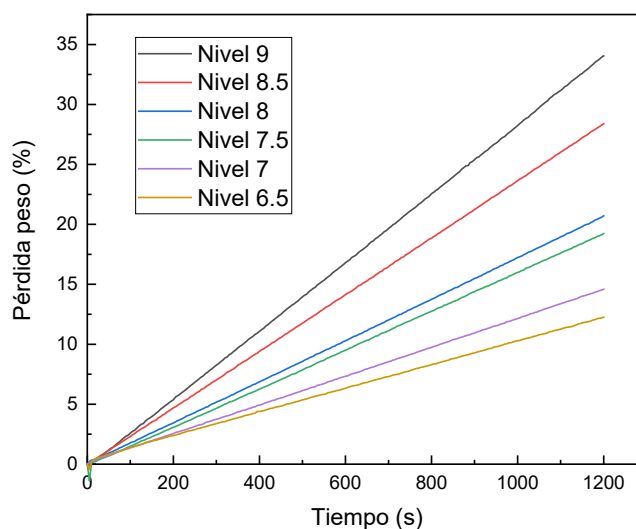


Figura III- 2. Evolución de la pérdida de peso durante la ebullición del agua para diferentes niveles de potencia (Datos correspondientes a la placa Bosch Schott Ceran PXY675DW4E/01).

Tabla III- 2. Velocidades de evaporación del agua en las dos placas de inducción utilizadas para diferentes niveles de potencia.

Nivel	Placa Bosch Schott Ceran PXY675DW4E/01			Placa Bosch Schott Ceran PIB375FB1E		
	Potencia (W)	Velocidad (g/s)	R ²	Potencia (W)	Velocidad (g/s)	R ²
6.5	573,2	0,1937 ±0,0002	0,9999			
7	677,8	0,2363 ±0,0001	0,9999	920	0,3337 ±0,0002	0,9998
7.5	871,9	0,3164 ±0,0002	0,9999	1123	0,4216 ±0,0001	0,9998
8	937,8	0,3402 ±0,0001	0,9999	1315	0,4817 ±0,0032	0,9999
8.5	1243,9	0,4676 ±0,0002	0,9999	1676	0,7135 ±0,0008	0,9999
9	1290,0	0,5644 ±0,0004	0,9999	2098	0,8908 ±0,0015	0,9999

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE LA CARNE POR CONTACTO CON UNA SUPERFICIE CALIENTE

Entre los diversos factores que pueden influir en las características físico-químicas de la carne cocinada por contacto con una superficie caliente, en este estudio se han abordado aspectos referentes a las condiciones iniciales de la carne, como son: el método de conservación utilizado hasta su cocinado, el espesor y tamaño de la pieza a cocinar y la temperatura inicial de la misma. En cuanto a los factores relacionados con las condiciones de cocinado se ha analizado la influencia del tiempo de cocinado lo que ha permitido caracterizar los diferentes grados de cocción, la temperatura inicial de la superficie de la sartén y el número de piezas a cocinar. En la Figura III- 3 se muestra un esquema de las condiciones experimentales de este estudio.

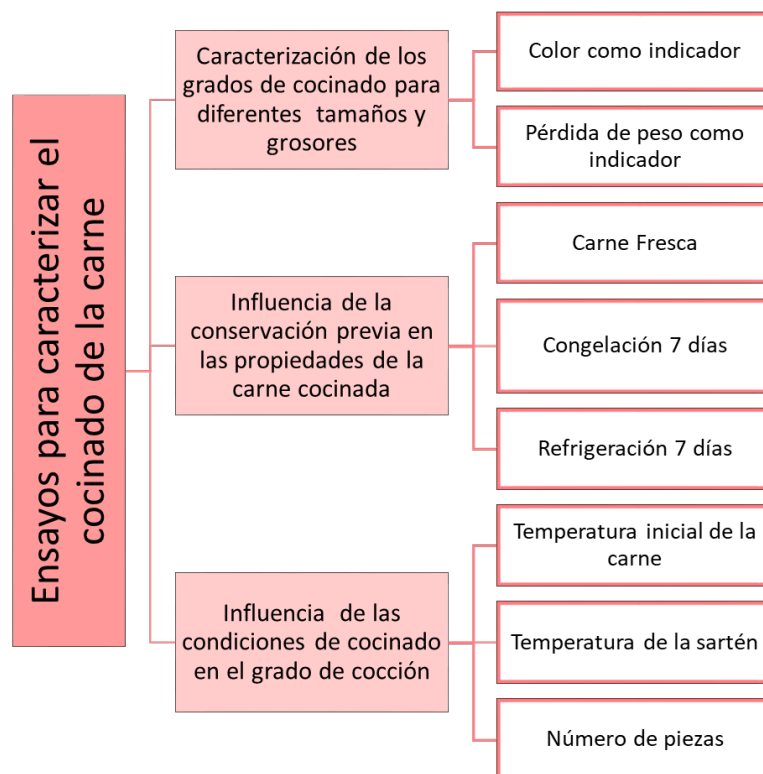


Figura III- 3. Ensayos para caracterización de la carne

3.2.1 Carne

Esta experimentación se realizó con carne de vacuno macho, de 1 año, de la raza Asturiana de los Valles, adquirida en un comercio local 7 días después de su sacrificio. Concretamente, se ha utilizado el lomo ubicado en la región dorsal que corresponde con el músculo *Longissimus dorsi* y que en término culinarios se conoce como entrecot.

3.2.2 Sistema experimental y condiciones de cocinado de la carne

La carne se cocinó por contacto con una superficie caliente utilizando el sistema experimental que se muestra en la Figura III- 4.

Todos los ensayos se realizaron utilizando la placa de inducción Bosch Schott Ceran PXY675DW4E/01 con la función de control de temperatura activada. En la mayor parte de los ensayos la carne se cocinó seleccionando el nivel 5, que implica una temperatura objetivo de 215 °C sobre la superficie de la sartén en contacto con la carne. Únicamente en los ensayos destinados a evaluar la influencia de la temperatura de la sartén se realizaron también pruebas con el nivel 4 correspondiente a una temperatura objetivo de 180 °C. En todos los casos, se utilizó una sartén Cromargan (WMF,

Geislingen, Alemania), que constaba de tres capas: una de acero de 0,6 mm en la parte inferior, una central de 3,5 mm de aluminio y otra de 0,8 mm de acero con un revestimiento de Teflón Platinum Plus en la parte superior. Las dimensiones de la sartén fueron 260 mm de diámetro de boca y 210 mm de diámetro de base en el fondo de la sartén (superficie en contacto con la carne).



Figura III- 4. Sistema experimental utilizado en los ensayos de cocinado de la carne (Izda.) y detalle de la medida de temperatura en el centro de la carne durante su cocinado (Dcha).

La placa de inducción se colocó sobre una balanza (DS30K0.1L, Kern & Sohn, Balingen-Frommern, Alemania) que dispone de un intervalo de medida de 0 a 30 kg y una precisión de 0,1 g, que permite tomar datos cada 5 s del peso de la carne durante el proceso de cocinado. El sistema experimental consta también de una cámara termográfica (modelo 875.2 con objetivo angular $32^\circ \times 23^\circ$, Testo, Lenzkirch, Alemania) que permitía comprobar que la temperatura de la superficie de la sartén estuviese en el valor deseado antes de comenzar el cocinado. También se utilizó también para captar imágenes a intervalos regulares durante el tiempo de cocinado con el objetivo de conocer la evolución de la temperatura de la cara superior de la carne.

Durante los experimentos se registró la temperatura en el centro geométrico de la carne mediante un termopar tipo T de punción de 1,5 mm de diámetro unido a un data logger (177-T4, Testo, Lenzkirch, Alemania) y el consumo energético mediante un vatímetro (WT230, Yokogawa, Tokio, Japón).

Con este sistema experimental se realizaron los ensayos en las condiciones que a continuación se detallan utilizando 8 réplicas para cada condición. A las muestras de

carne en crudo y tras el cocinado se les analizó instrumentalmente la textura y el color mediante análisis digital de imágenes tomadas mediante escáner. En la sección (3.2.6) se muestra la descripción detallada de estos análisis.

3.2.3 Ensayos de cocinado de carne

3.2.3.1 Ensayos para caracterizar los diferentes grados de cocción

Los filetes de lomo de ternera de $1,9 \pm 0,2$ cm de grosor se trocearon en piezas cuboides de aproximadamente $2,5 \times 1,9 \times 5$ cm (correspondientes a un peso de $43,7 \pm 6,7$ g) (Figura III- 5). Se mantuvieron en refrigeración a 4 ± 1 °C en un frigorífico Bosch KGN36VW35 (BSH, Munich, Alemania) como máximo durante dos días antes de su cocinado. La carne se atemperó a 20 °C antes de su cocción.



Figura III- 5. Trozos de filete de lomo de ternera.

Se llevaron a cabo cocciones con una duración correspondiente a cinco puntos de cocción: “Grado 1” (3 min), “Grado 2” (5 min), “Grado 3” (6 min), “Grado 4” (7 min) y “Grado 5” (12 min). Cuando había transcurrido 2/3 del tiempo total de cocinado se daba la vuelta al producto.

3.2.3.2 Ensayos para determinar la influencia del método de conservación de la carne en las propiedades de la carne cocinada.

Para estudiar el efecto de las condiciones de conservación propias del ámbito doméstico en las características de la carne cocinada, se establecieron tres casos: carne cocinada inmediatamente tras la compra (denominada fresca), carne conservada en refrigeración 7 días a 4 °C (denominada refrigerada), y carne congelada a -20 °C el día de la compra y descongelada transcurridos 7 días (denominada congelada). Para ello se utilizó un frigorífico-congelador Combi de Bosch KGN36VW35 (BSH, Munich, Alemania). Estos ensayos se realizaron con trozos de lomo de ternera de $2,5 \times 1,9 \times 5$ cm. Las piezas congeladas se descongelaron a 4 °C durante 24 h en el interior del frigorífico

y todas las muestras se atemperaron a 20 °C. Antes de su cocción, se determinó el contenido de humedad, la capacidad de retención de agua y el pH. La cocción se realizó para los cinco grados de cocción anteriormente indicados.

3.2.3.3 Ensayos para analizar la influencia del tamaño y grosor de la carne en el grado de cocción

El objetivo de estos ensayos fue estudiar la influencia del tamaño y del grosor de la carne en el grado de cocción durante su cocinado doméstico en placa de inducción. De esta forma se pretende conocer cómo modificar el tiempo de cocción para que la temperatura en el centro de la carne sea la correspondiente al grado de cocción deseado por el usuario, independientemente del grosor de la pieza de carne.

Para estudiar el efecto del tamaño de la pieza de carne en la evolución del cocinado, se realizaron ensayos de cocción de filetes de lomo de ternera enteros de $1,9 \pm 0,2$ cm de grosor (correspondientes a un peso de $324,2 \pm 45,9$ g), cortados en la dirección perpendicular al eje longitudinal del músculo. Para analizar la influencia del grosor de la carne se trocearon filetes de lomo de tres grosores ($1,9 \pm 0,2$ cm, $2,6 \pm 0,1$ cm y $3,4 \pm 0,2$ cm) en piezas cuboides de: $2,5 \times 1,9 \times 5$ cm (correspondientes a un peso de $43,7 \pm 6,7$ g), $2,5 \times 2,6 \times 5$ cm (correspondientes a un peso de $51,9 \pm 12,9$ g) y $2,5 \times 3,4 \times 5$ cm (correspondientes a un peso de $71,9 \pm 16,3$ g). La temperatura inicial de la carne fue de 20 °C. Las piezas de carne se cocinaron para los cinco grados de cocción establecidos para lo cual fue necesario determinar primero los nuevos tiempos de cocción.

3.2.3.4 Ensayos para analizar la influencia de la temperatura de la sartén, la temperatura inicial de carne en el grado de cocción, y del número de piezas en la cocción

El objetivo de estos ensayos fue estudiar la influencia de la temperatura inicial de la sartén, de la temperatura inicial de carne y del número de piezas cocinadas en la evolución de la temperatura interna y en la pérdida de peso durante el cocinado.

Para analizar la influencia de la temperatura inicial de la sartén se realizaron ensayos con los niveles 4 y 5 que corresponde a una temperatura de sartén de 180 °C y 215 °C, respectivamente. Por otro lado, se estudió la influencia de la temperatura inicial de la carne. Para ello, se establecieron dos temperaturas que pueden darse en el ámbito

doméstico: 20 °C (temperatura ambiente), dejando atemperar la carne antes de su cocinado y 4 °C (temperatura de refrigeración) que correspondería al caso de cocinar la carne inmediatamente después de sacarla del frigorífico. En ambos casos el estudio se realizó con trozos de lomo de ternera en piezas de forma paralelepípedo rectangular de 2,5 x 1,9 x 5 cm (correspondientes a un peso de $43,7 \pm 6,7$ g). Las cocciones se llevaron a cabo para los cinco grados de cocción establecidos. Para determinar cómo se modifica la cocción al variar el número de piezas se utilizaron 1 y 3 trozos de ternera de 2,5 x 1,9 x 5 cm y se cocinaron a dos grados de cocción (Grado 4 y Grado 5).

3.2.4 Ensayos para determinar en la carne el contenido de agua en el equilibrio

Se determinó el contenido de agua de equilibrio en función de la temperatura, en lomo de ternera siguiendo el procedimiento propuesto por Goñi y Salvadori (2010). Cinco muestras de carne de 4 mm de grosor de 2,0-3,7 g de peso se introdujeron en bolsas de cocción (Orved, Musile di Piave, Italia) y se sumergieron en un baño termostático (Digiterm-100, JP Selecta, Abrera, España) durante 30 min (tiempo considerado de equilibrio a partir del cual apenas hay más pérdida de peso). Este ensayo se realizó para diferentes temperaturas del baño (30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 °C). Después del tratamiento térmico, se sumergieron las bolsas en un baño de agua con hielo para detener el calentamiento. Las muestras se secaron utilizando papel de celulosa y se pesaron en una balanza analítica (modelo ML204T/00, Mettler Toledo, Suiza). Posteriormente, se pusieron en una estufa durante 16-18 h a 105 °C y se volvieron a pesar (Figura III- 6). Por diferencia de pesada se determinó la humedad de las muestras y el resultado del contenido de agua se expresó en kg de agua / kg de materia seca.

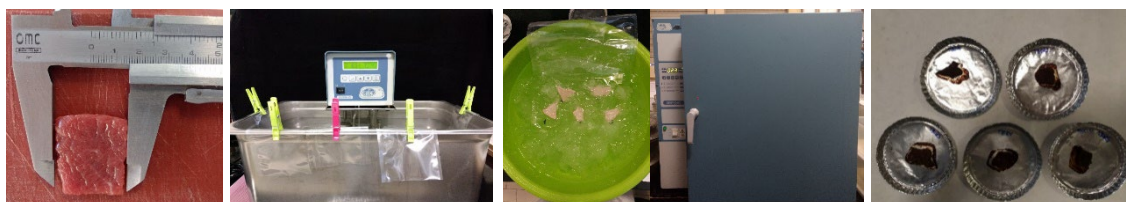


Figura III- 6. Ensayos para determinar la capacidad de retención de agua.

3.2.5 Ensayos para determinar la cinética de cambio de color de la carne

Para la determinación de la cinética de cambio de color del lomo de ternera, 5 muestras de carne de 4 mm de grosor de 2,0-3,7 g de peso se introdujeron en bolsas de cocción (Orved, Musile di Piave, Italia) y se sumergieron en un baño termostático

(Digiterm-100, JP Selecta, Abrera, España) durante tiempos comprendidos entre 10 s y 30 min, utilizándose tantas bolsas como tiempos de cocción se fuesen a testar (Figura III- 7). Los ensayos se realizaron con las siguientes temperaturas del agua: 30, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80 y 90 °C. Transcurrido el tiempo de cocción se extraía la bolsa correspondiente y se sumergía en un baño de agua con hielos para frenar las reacciones. Las muestras se secaron con un papel adsorbente de celulosa y se escanearon (Scan Lide 210, Canon, Tokio, Japón) obteniéndose imágenes en formato JPEG con una resolución de 600 ppp (Figura III- 8). Posteriormente se determinaron las coordenadas CIELab con el programa informático Matrox 8.0. (Matrox Electronic Systems Ltd, Canada). Estas medidas se realizaron para carne de lomo de ternera fresca, refrigerada y congelada.

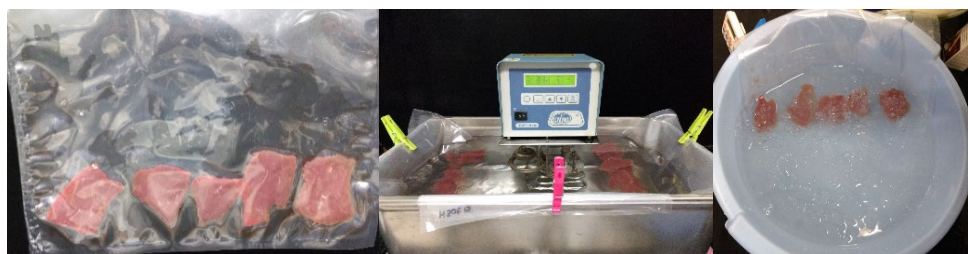


Figura III- 7. Ensayo para determinar la cinética de cambio de color de la carne de ternera.

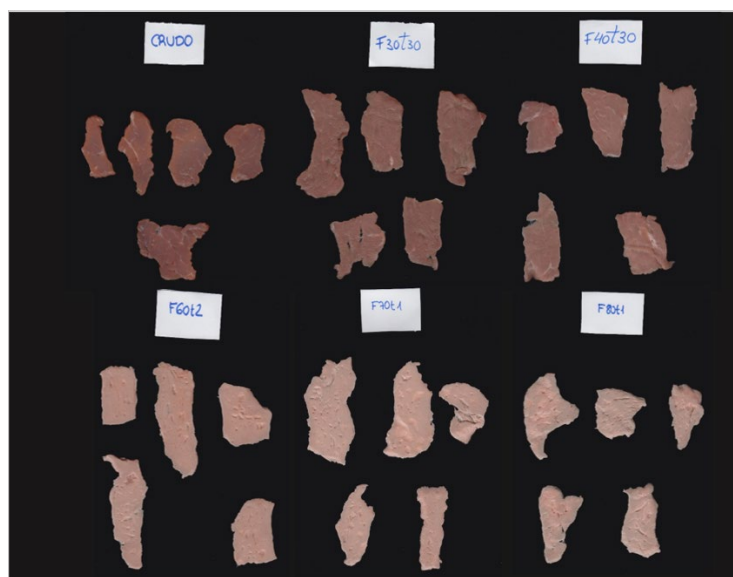


Figura III- 8. Imágenes escaneadas de trozos de lomo de ternera a diferentes temperatura y tiempos.

3.2.6 Análisis físico-químico de la carne

3.2.6.1 Humedad

La humedad se determinó mediante método gravimétrico de acuerdo el método oficial 950.46 de la AOAC (AOAC, 2002a). Se pesaron de 2 a 4 g de carne y se llevaron

a la estufa de convección (Digitronic JP Selecta, España) durante 24 h a 105 °C. Tras el proceso de secado en estufa, las muestras se enfriaron en un desecador y se pesaron. La humedad se expresó en g agua/100 g b.h., a partir de los datos obtenidos de cinco réplicas para cada condición.

3.2.6.2 *Determinación del pH*

Se utilizó un pH-metro portátil Crison modelo pH 25 (Crison Instruments S.A., España) equipado con un electrodo penetrante. Se realizaron cinco réplicas por muestra, expresando el resultado como el promedio.

3.2.6.3 *Capacidad de retención de agua por compresión*

La capacidad de retención de agua (CRA) se midió utilizando el método de compresión (Hamm, 1961). Se colocaron aproximadamente 0,3 g carne sobre papel de filtro (nº 54 de 110 mm de diámetro, Whatman) doblado por la mitad entre dos placas de metacrilato de 12,5x7 cm y se ajustaron con tornillos ejerciendo una presión controlada durante 5 min (Figura III- 9). El filtro se pesó antes y después de la compresión mediante una balanza analítica (modelo ML204T/00, Mettler Toledo, Suiza). La capacidad de retención de agua (%) se determinó mediante la expresión:

$$CRA = \left[1 - \left(\frac{\text{Peso de agua en el filtro (g)}}{\text{Peso inicial muestra (g)}} \right) \right] \times 100 \quad \text{ec. (3.1)}$$



Figura III- 9. *Determinación de la capacidad de retención de agua por compresión.*

3.2.6.4 *Análisis de textura*

La textura de la carne se caracterizó mediante ensayos utilizando el texturómetro TA.XT.plus Texture Analyzer (Stable Micro Systems, Godalming, UK) equipado con el software Exponent 6.1.13.0 (Stable Micro Systems, Godalming, UK).

Tabla III- 3. Condiciones de los ensayos de textura de la carne.

Producto	Preparación de la muestra	Tipo de test y parámetro determinado	Célula de carga	Tipo de sonda	Velocidad y tiempo
Lomo de ternera (Rabeler y Feyissa, 2018b)	Corte transversal de muestras de 2,5 x 2,5 cm 10 réplicas	TPA Compresión 40 %	30 Kg	Sonda de compresión cilíndrica Ø = 50 mm	1 mm/s 5 s entre 1ª y 2ª compresión

Las muestras de lomo de ternera se analizaron mediante test de doble compresión, TPA (Texture Profile Analysis), utilizando una sonda cilíndrica y siguiendo la metodología descrita por Rabeler y Feyissa (2018b). Las condiciones de medida se detallan en la Tabla III- 3. El análisis imita la acción de las mandíbulas al masticar y de la curva fuerza-tiempo generada se obtienen un conjunto de parámetros texturales que se correlacionan con la evaluación sensorial (Figura III- 10). Los parámetros que se obtienen a partir del ensayo TPA se muestran en la Tabla III- 4.

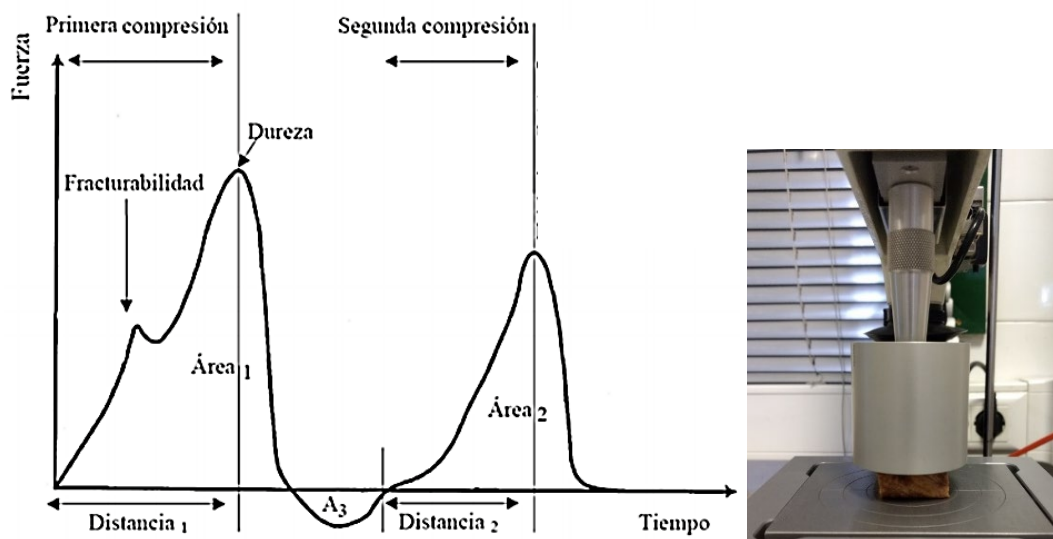


Figura III- 10. Curva generada en Análisis de Perfil de Textura (TPA) (izda). Ensayos de textura realizados para analizar la textura de la carne: test de compresión de cuboides de lomo de ternera (dcha).

Tabla III- 4. Parámetros determinados en un ensayo de doble compresión.

Parámetro	Definición	Unidades
Dureza	Fuerza necesaria para lograr una deformación determinada	N
Fracturabilidad	Fuerza necesaria para fracturar la muestra	N
Adhesividad	Trabajo necesario para vencer la fuerza de atracción entre la muestra y una superficie (A_3).	N · s
Cohesividad	Representa la resistencia de un material a una segunda deformación con relación a como este se comportó en un primer ciclo de deformación. Mide el trabajo realizado en la segunda compresión dividido entre el trabajo durante la primera compresión. Relación A_2/A_1	Adimensional
Elasticidad	Capacidad que tiene una muestra deformada para recuperar su forma o longitud inicial después de que la fuerza ha impactado en ella. Relación $distancia_2/distancia_1$	Adimensional
Gomosidad	Fuerza necesaria para desintegrar una muestra de alimento semisólido a un estado tal que facilite su ingesta	N
Masticabilidad	Fuerza necesaria para masticar un alimento sólido hasta un estado tal que permita su ingesta. Es el producto de dureza, cohesividad y elasticidad.	N

3.2.6.5 Análisis de imágenes termográficas

Las imágenes termográficas se adquirieron durante los experimentos en los que se cocinaba la carne con los objetivos de:

- Confirmar que la sartén había alcanzado la temperatura objetivo para el cocinado de la carne (normalmente 215 °C).
- Obtener la evolución del perfil de temperaturas en la cara superior de la carne durante su cocinado.

Para todo ello se empleó una cámara termográfica de la marca TESTO, modelo 875.2 con objetivo angular 32° x 23° y el software TESTO IRsoft para el postprocesado de las imágenes térmicas. La cámara termográfica se situó sobre la sartén durante el cocinado de las matrices alimentarias tal y como se ha mostrado en la Figura III- 11. El método empleado para realizar las medidas de la temperatura en la superficie superior de la carne fue el siguiente:

- a) Captura de imágenes termográficas

Antes de realizar una captura de la imagen termográfica de un objeto se debe de determinar la temperatura de la radiación reflejada por un radiador Lamber. Un radiador Lamber es un objeto que refleja la radiación incidente con la difusión óptima, es decir, con la misma intensidad en cualquier dirección. Se considera un buen radiador Lamber una lámina de papel de aluminio arrugada y alisada de nuevo, puesto que la lámina tiene una elevada reflexión y, gracias a las arrugas, la reflexión difusa de la radiación es casi perfecta. Para medir la temperatura de la radiación reflejada, se sitúa el papel de aluminio arrugado sobre la superficie del objeto a medir. Se mide la temperatura del papel de aluminio con la emisividad ajustada a un valor de 1. A continuación, se capturan imágenes termográficas del objeto deseado con la emisividad ajustada a 0,95.

Se debe de realizar además la medición de la temperatura y la humedad ambiental mediante un registrador 175-H2 de TESTO ya que estos datos son necesarios para el post-procesado.

b) Post-procesado de las imágenes

Primero con las imágenes tomadas del papel de aluminio se determina la temperatura de la radiación reflejada tras introducir los valores de temperatura y humedad ambiental. Después se procede a obtener el histograma de temperaturas y la temperatura promedio de la matriz a estudiar sobre las imágenes ya ajustadas con los valores de la temperatura reflejada y temperatura y humedad ambientales (Figura III- 11).

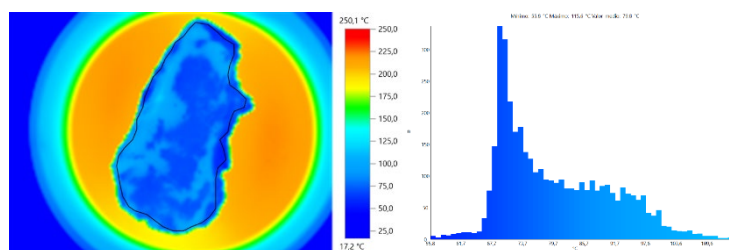


Figura III- 11. Imagen termográfica de filete de lomo de ternera e histograma de temperatura (de izquierda a derecha).

3.2.6.6 *Análisis de color*

Para obtener el color, las muestras de carne se dejaron reposar 10 min tras el cocinado, se cortaron longitudinalmente por la mitad y se escanearon las superficies internas (Scan Lide 210, Canon, Tokio, Japón), con una resolución de 600 ppp. Durante la digitalización de las muestras, éstas se cubrieron con una caja negra. Las imágenes se

obtuvieron en un formato JPEG y se procesaron con el software Matrox 8.0 (Matrox Electronic Systems Ltd, Dorval, Canadá). El calibrado del escáner se realizó con patrones de la norma española de colores UNE 48-103-94, correspondientes a las gamas de rojos y marrones. Las coordenadas de color CIELab se correlacionaron mediante un modelo cuadrático simple con los valores RGB (Leon et al., 2006) utilizando para ello la herramienta Solver de Microsoft Excel. Se seleccionó una región de interés, ROI, de 3 x 3 mm en la zona central de la carne para obtener el color en el punto más frío (Figura III-12).

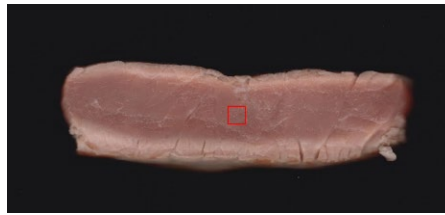


Figura III- 12. Imagen del trozo de carne con la sección elegida para evaluar el color en el centro del producto.

También se determinaron las coordenadas CIELab a lo largo del espesor para diferentes grados de cocción y tiempos de volteo. A partir de estos datos y los obtenidos con la carne cruda se determinó el perfil del color absoluto o diferencia de color, ΔE^* , en el eje transversal de la carne (Figura III- 13), utilizando la siguiente expresión:

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad \text{ec. (3.2)}$$

Donde L_0^* , a_0^* y b_0^* son las coordenadas CIELab de la carne cruda y L^* , a^* y b^* de la carne tras su cocinado.



Figura III- 13. Imagen de un trozo de carne tras ser cortado longitudinalmente. Se muestra la línea en donde se midió el perfil del color absoluto a lo largo del espesor.

3.2.6.7 Análisis de las propiedades reológicas de la carne

Las medidas reológicas se realizaron utilizando un reómetro de stress controlado (MRC 30, Anton Paar Ostfildern, Alemania). El sistema utilizado fue de geometría plato-plato rugoso de 50 mm de diámetro (PP50/S) (Figura III- 14).



Figura III- 14. Reómetro utilizado con sonda plato-plato rugosa.

Las determinaciones se realizaron sobre trozos de carne de 4 mm de espesor y un diámetro de 50 ± 1 mm (aproximadamente 8 g). Las muestras se dejaron reposar durante 30 min antes de su medición. El gap fue de 3-4 mm. La muestra se cubrió con una capa de aceite de silicona en el lateral para minimizar la evaporación de la humedad a alta temperatura. Se midieron seis réplicas de cada muestra por cada condición experimental.

Se realizaron barridos de frecuencia (0,1 - 10 Hz) a esfuerzo constante y barridos de esfuerzo (0,1-1000 Pa) a frecuencia constante para elegir la frecuencia y el esfuerzo constante dentro de la región viscoelástica lineal a utilizar en los ensayos oscilatorios (Figura III- 15).

Se realizaron ensayos oscilatorios con una frecuencia constante de 2 Hz y un esfuerzo constante de 3 Pa. Se aumentó la temperatura de la muestra desde 25 °C hasta 100 °C con incrementos de 5 °C y un periodo de mantenimiento de 3 min (lo suficiente para asegurar la estabilidad en la medición). La evolución del módulo de almacenamiento (G'), del módulo de pérdida (G'') y el ángulo de fase (relación entre el módulo de pérdida y el módulo de almacenamiento) (ϕ), con la temperatura, se registró mediante el software del reómetro Rheoplus V3.40 (Anton Paar Ostfildern, Alemania).

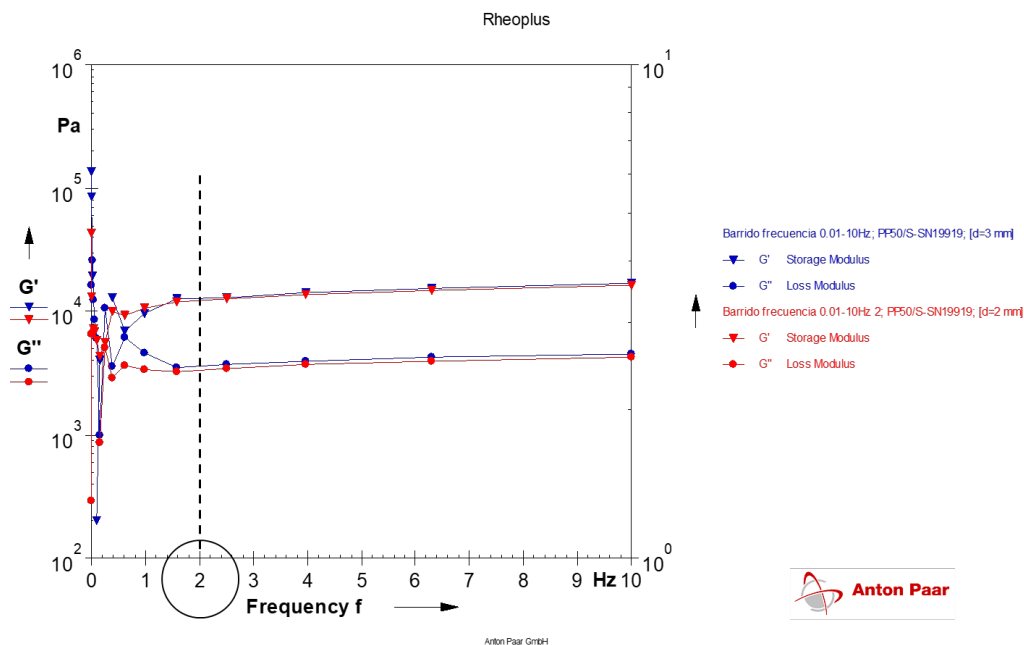


Figura III- 15. Evolución del módulo de pérdida, G'' , y de almacenamiento, G' , en un ensayo de barrido de frecuencia.

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE PANQUEQUES POR CONTACTO CON UNA SUPERFICIE CALIENTE

Durante el cocinado por contacto con una superficie caliente se da la vuelta a los alimentos para cocinar por ambos lados sin tener información del estado del alimento en la cara inferior. Por lo que esta acción es un interesante caso de cómo la asistencia al cocinado puede ayudar al usuario. Por ello, en este estudio se han abordado distintos criterios en base a los cuales se puede dar la vuelta al panqueque. Por otra parte, se ha analizado cómo un cambio en la composición de la harina con la que se elaboran los panqueques puede ser muy importante en la evolución de las propiedades reológicas de la masa durante la cocción.

3.3.1 Masa del panqueque

La elaboración de la masa se realizó utilizando los siguientes ingredientes en los porcentajes en peso indicados en Tabla III- 5, según formulación indicada en las normas para valoración de equipos de cocinado. Los ingredientes utilizados fueron: harina de trigo (Nevisca, Harinas Polo, Villanueva de Gállego, Zaragoza), huevo líquido pasteurizado (Pascual, Aranda de Duero, España), leche entera UHT (Pascual, Aranda de Duero, España) y sal yodo-fluorada (Marismeña, Huelva). Se colocó en un bol la harina

y se hizo un hueco en el centro. Se espolvoreó la sal alrededor, se adicionaron $\frac{3}{4}$ partes de la leche lentamente en el interior del agujero y se mezclaron los ingredientes comenzando por el centro hacia los bordes del recipiente. Se añadió la mitad de los huevos y se mezcló hasta obtener una masa homogénea. A continuación, se añadieron el huevo restante, se mezclaron, y se adicionó el resto de la leche, poco a poco, resultando una masa esponjosa y sin grumos. La mezcla se realizó de forma manual con un batidor de varillas de acero inoxidable.

Tabla III- 5. Porcentajes es peso de los ingredientes utilizados para la elaboración de la masa de los panqueques.

Ingredientes	Porcentaje (%)
Harina	26,8
Huevo Líquido	21,0
Leche entera UHT	51,6
Sal	0,6

3.3.2 Sistema experimental y condiciones de cocinado de los panqueques

El sistema experimental y las etapas del proceso de cocinado de los panqueques se muestra en la Figura III- 16. Los panqueques se cocinaron por contacto con una sartén con revestimiento antiadherente con partículas de titanio de 220 mm de diámetro Easy induction (KUHN RIKON, Rikon, Suiza). El fondo de la sartén (superficie en contacto con la masa), tenía un diámetro de 180 mm. Como fuente de calor se utilizó una placa de inducción Bosch Schott Ceran PIB375FB1E (BSH, Munich, Alemania) que no dispone de sistema de control de temperatura, colocada sobre una balanza (DS30K0.1L, Kern & Sohn, Balingen-Frommern, Alemania) que dispone de un intervalo de medida de 0 a 30 kg y una precisión de 0,1 g. De este modo se pueden tomar los datos de peso cada 5 s que permiten conocer la evolución de la pérdida de agua del panqueque durante el proceso de cocinado. La masa del panqueque (100 mL) se adicionaba a la sartén cuando la temperatura en su superficie había alcanzado los 230 ± 2 °C y se cocinaba durante 240 s. Los ensayos se realizaron solo para una cara del panqueque sin llegar a ejecutar el giro del panqueque para finalizar su cocinado. Para asegurar que la temperatura fuese la correcta, se disponía de una cámara termográfica (modelo 875.2 con objetivo angular $32^\circ \times 23^\circ$, Testo, Lenzkirch, Alemania) que se utilizaba además para captar imágenes termográficas de la cara superior del panqueque.

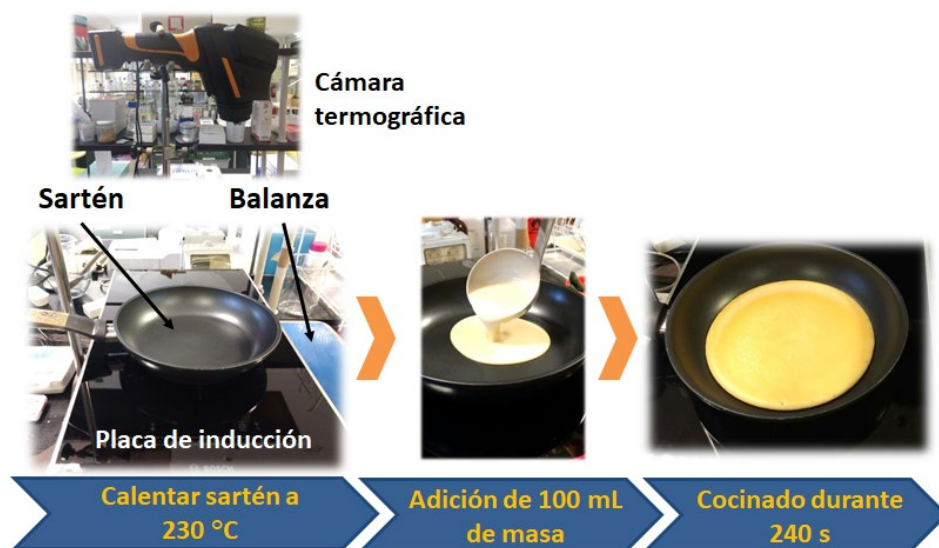


Figura III- 16. Esquema de proceso de cocinado de panqueques.

3.3.3 Ensayos de cocinado de los panqueques

3.3.3.1 Ensayos previos para establecer las condiciones de cocción

Se realizaron una serie de ensayos previos para establecer las condiciones de cocción definitivas más adecuadas para los panqueques. En primer lugar, aunque el procedimiento de cocinado de los panqueques de la norma (UNE-CTN_213/SC_59, 2019), indica que se cocinen los panqueques con 5 g de aceite, se decidió prescindir del uso de aceite tras la realización de las pruebas preliminares. Como se puede observar en la Figura III- 17 se obtuvieron panqueques muy heterogéneos a causa del cocinado con aceite, por lo que se descartó su uso ya que la heterogeneidad dificultaba el análisis posterior de los resultados.



Figura III- 17. Panqueque cocinado con aceite a 947 W de potencia durante 240s.

En los ensayos posteriores realizados sin aceite con una sartén antiadherente nueva, se obtuvieron panqueques heterogéneos para el mismo tiempo de cocción y nivel

de potencia (Figura III- 18 izquierda). Esta heterogeneidad se debió a una adherencia heterogénea entre la masa y la sartén. Por ello se envejeció la sartén mediante un procedimiento de abrasión (30 min con un cepillo de limpieza electrónico Jooheli, girando a 198 rpm acoplado a un estropajo Scotch Brite Classic). Se realizaron ensayos similares en cuanto a tiempo de cocción y nivel de potencia con la sartén envejecida y se obtuvieron panqueques más homogéneos como se muestra en la Figura III- 18 derecha.

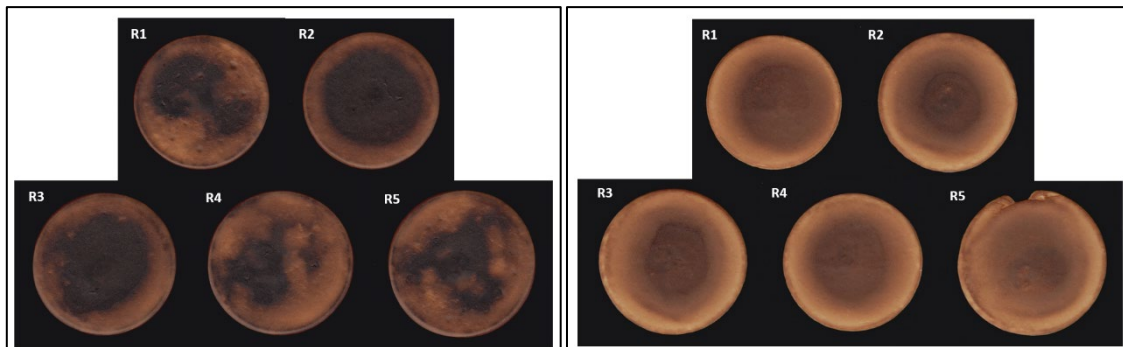


Figura III- 18. Réplicas de panqueques a 947 W durante 240 s en sartén antiadherente (izquierda) en sartén con tratamiento de envejecimiento (derecha).

3.3.3.2 Ensayos para determinar el criterio a adoptar para dar la vuelta al panqueque

La acción de dar la vuelta a la masa debe de realizarse en base a criterios como que se haya desarrollado el color deseado, que la masa haya adquirido la consistencia suficiente para poder voltearla sin derrames, es decir que haya gelificado la cara superior de la masa, o que el avance del frente térmico sea suficiente para que tras la siguiente etapa se alcance la temperatura deseada en el centro del producto. Por lo tanto, fue necesario caracterizar los cambios que experimenta la masa durante la cocción analizando la evolución durante el cocinado del color de la cara del panqueque en contacto con la sartén, registrando la pérdida de peso de los panqueques durante su cocinado y determinando la temperatura superficial de los panqueques durante su cocinado mediante imágenes termográficas. Estos ensayos se realizaron para diferentes niveles de potencia y tiempos de cocción, realizándose cinco réplicas para cada condición:

- a) Potencias ensayadas: $647 \pm 10,56$ W, $947 \pm 13,90$ W y $1144 \pm 8,50$ W.
- b) Tiempos de cocción: 30 s, 60 s, 90 s, 120 s, 150 s, 180 s, 210 s y 240 s.

3.3.3.3 Ensayos para caracterizar la cocción de panqueques de diferente composición

Uno de los factores que influye en el desarrollo del proceso de cocción en las masas batidas, es la composición de las harinas con las que se elaboran, por lo que se abordó el estudio de la influencia de la incorporación en la formulación de diferentes tipos de harinas, especialmente aquellas con un perfil nutricional más interesante. Las siete harinas seleccionadas para el estudio fueron harina de trigo (Harinas Polo, Zaragoza), harina de espelta (Biospirit, Gerona), harina de avena integral (Harimsa, Cartagena, Murcia), harina de arroz integral (Biospirit, Gerona), harina de maíz (Biospirit, Gerona), harina de garbanzo y harina de lenteja (Molendum Ingredients, Zamora). Las harinas se obtuvieron en el mercado local.

Los métodos de análisis aprobado por la AACC (AACC, 2000) utilizados para el análisis composicional de las diferentes harinas fueron: humedad (secado en estufa at 103 °C, método no. 44-15A), cenizas (calcinación a 550 °C, método no. 08-01), lípidos (extraídos con Soxhlet utilizando éter de petróleo como disolvente, método no. 30-25), proteínas (método Kjeldahl, Nx5.7, método no. 46-10) y fibra (método no. 32-05). El contenido en carbohidratos se determinó por diferencia. Los resultados así obtenidos se muestran en la Tabla III- 6.

Tabla III- 6. Porcentajes en peso de humedad y macronutrientes de los ingredientes de los panqueques (valores medios $\pm$ desviación estándar). Para el huevo y la leche los datos son los suministrados por el fabricante

Ingrediente	Humedad (%)	Cenizas (%)	Grasa (%)	Proteína (%)	Fibra (%)	Carbohidratos (%)
Harina de trigo	14,50 $\pm$ 0,15	0,55 $\pm$ 0,01	1,40 $\pm$ 0,01	11,00 $\pm$ 0,10	2,40 $\pm$ 0,02	70,15 $\pm$ 0,77
Harina de espelta integral	11,72 $\pm$ 0,12	1,83 $\pm$ 0,05	3,60 $\pm$ 0,04	13,02 $\pm$ 0,15	5,83 $\pm$ 0,04	64,00 $\pm$ 0,71
Harina de avena integral	9,66 $\pm$ 0,12	3,98 $\pm$ 0,04	7,89 $\pm$ 0,09	12,70 $\pm$ 0,11	9,67 $\pm$ 0,10	56,10 $\pm$ 0,59
Harina de arroz integral	12,61 $\pm$ 0,09	1,39 $\pm$ 0,03	0,52 $\pm$ 0,01	6,50 $\pm$ 0,07	2,63 $\pm$ 0,03	76,35 $\pm$ 0,79
Harina de maíz	11,11 $\pm$ 0,13	2,08 $\pm$ 0,02	2,80 $\pm$ 0,05	9,01 $\pm$ 0,08	6,63 $\pm$ 0,04	68,37 $\pm$ 0,71
Harina de garbanzo	8,07 $\pm$ 0,09	2,75 $\pm$ 0,03	5,68 $\pm$ 0,08	20,02 $\pm$ 0,25	13,12 $\pm$ 0,12	50,36 $\pm$ 0,55
Harina de lenteja	8,70 $\pm$ 0,11	2,32 $\pm$ 0,03	1,83 $\pm$ 0,03	24,87 $\pm$ 0,21	8,33 $\pm$ 0,09	53,95 $\pm$ 0,54
Huevo	77,69	0,38 (sal)	9,66	11,59	0	0,68
Leche entera	88,82	0,12(sal)	3,49	2,91	0	4,66

Las harinas se caracterizaron mediante las siguientes propiedades de hidratación: el índice de solubilidad del agua, el índice de absorción de agua y la capacidad de absorción de agua, según se describe en la sección (3.3.5.1).

La elaboración de la masa se realizó tal y como se ha detallado previamente cambiando el tipo de harina. Las diferentes masas se caracterizaron mediante ensayos reológicos realizados a temperatura constante y con rampa de calentamiento, tal y como se describe en la sección (3.3.5.2). Los ensayos se realizaron con un nivel de potencia de $8.5 (947 \pm 4 \text{ W})$ durante 240 s por una cara del panqueque.

3.3.4 Ensayos para determinar la cinética de cambio de color y humedad de los panqueques

Para la determinación de la cinética del cambio de color de los panqueques se utilizó una placa calefactora eléctrica SANDVIK con control de temperatura de hasta 600°C y 1500 W de potencia, que permitía el cocinado de muestras a temperatura homogénea, con superficie de material refractario y bastidor metálico con unas dimensiones de 260 mm x 300 mm. Se empleó una sartén marca Fissler, modelo Steelux Premium de 240 mm de diámetro y recubrimiento de teflón, para el cocinado de las muestras a temperatura homogénea.

Con la finalidad de obtener muestras lo más homogéneas posibles tanto para la medida de color como para las medidas de humedad, se evaluaron diferentes métodos de cocción de los panqueques:

- Se prepararon muestras colocando un molde circular de 60 mm de diámetro sobre la superficie de la sartén antiadherente y llenándolo con 10 mL de masa. Se obtuvieron panqueques circulares del tamaño del molde y espesor constante con grandes heterogeneidades en el color, originadas por bolsas de vapor de cocción atrapadas en la intercara entre la superficie de la sartén y el panqueque y las paredes del molde.
- Se prepararon muestras vertiendo directamente 10 mL de masa sobre la sartén antiadherente y transcurridos 30 segundos se colocó un contra-molde plano circular de 200 g sobre la masa. Se observó un aumento de la homogeneidad en el color y de la velocidad en el cambio de color, debido a un mejor contacto entre la sartén y el panqueque, aunque sin llegar a ser homogéneas.

– Finalmente se decidió preparar las muestras en la sartén WMF, modelo Sensor, añadiendo directamente en el centro de la sartén 25 mL de masa, retirándola tras el tiempo de cocción previsto. Aunque previamente se había caracterizado por termografía la superficie de la sartén, antes de verter la masa se comprobaba la temperatura en la superficie de la sartén con la cámara termográfica y mediante un termopar tipo K y un registrador de datos TESTO 177-T4 conectado a un PC con el software proporcionado por el fabricante.

Siguiendo la metodología seleccionada se prepararon panqueques a diferentes temperaturas desde 110 °C hasta 240 °C. Para cada temperatura se elaboraron panqueque con distintos tiempos de cocción entre 1 y 25 min. De todas las condiciones se realizaron cuatro réplicas. Dos de las muestras de cada condición se utilizaron para la medida de color, para lo cual se troquelaron, se escanearon y se analizaron digitalmente. Las otras dos muestras se usaron para determinar la humedad.

3.3.4.1 Determinación del color del panqueque

Para la adquisición de las imágenes se empleó el escáner CanoScan Lide 210 y software Canon MP Navigator EX 4.0. Para cubrir la pantalla del escáner durante la digitalización de los panqueques se construyó una tapa hueca, forrando una fuente metálica para horno con fieltro negro.

Los panqueques obtenidos para la determinación de la cinética de cambio de color se troquelaron con un sacabocados cilíndrico de 60 mm de diámetro y se escanearon con una resolución de 600 ppp, obteniendo imágenes en formato JPEG de 767x767 píxeles, con una profundidad de color de 24 bits y presentación RGB. Con un programa desarrollado para el software MATLAB, se determinó el valor medio del color en coordenadas CIELab. Mediante el software se seleccionó el área de cálculo, por lo general un diámetro de 250 píxeles, para evitar los bordes desconchados por el troquelado. En algunos casos concretos en que el área con color homogéneo era menor, se redujo este diámetro a 200 o 150 píxeles, con la única implicación de reducir la población empleada para calcular los valores medios

3.3.4.2 *Determinación de la humedad del panqueque*

Para cada tiempo de cocción se pesó la masa después de retirarla de la sartén, utilizando una balanza analítica de precisión Mettler Toledo, modelo AE200. A continuación, se introdujo en una estufa (Digitronic de Selecta S.L.) a 100 °C durante 48 h, tras lo cual se pesó la masa desecada. Por diferencia de pesada se obtuvo la humedad de los panqueques cocinados a diferentes temperaturas y tiempos. Adicionalmente, se determinó por el mismo procedimiento la humedad de las masas crudas utilizadas para la elaboración de los panqueques.

3.3.5 *Análisis físico-químico de los panqueques*

3.3.5.1 *Propiedades de hidratación de las harinas utilizadas en la elaboración de las masas*

Índice de solubilidad de agua e índice de absorción de agua

El índice de solubilidad en agua (WSI) y el índice de absorción de agua (WAI) de las harinas se determinaron según lo descrito por Kaur y Singh (2005). Se añadieron 30 mL de agua destilada a 2,5 g de harina y la mezcla se agitó con una varilla de vidrio. Se calentó a 90 °C durante 15 min. Después de enfriar a temperatura ambiente, las muestras se centrifugaron a 3000 g durante 10 min. Se decantó el sobrenadante y se pesó el sedimento. La cantidad de sólido disuelto en el sobrenadante se determinó por pérdida de peso después de secar a 110 °C durante 24h en una estufa de convección forzada. El índice de solubilidad en agua se calculó como:

$$WSI (\%) = \left(\frac{\text{Peso de sólido disuelto en sobrenadante (g)}}{\text{Peso de muestra seca (g)}} \right) \times 100 \quad \text{ec. (3.3)}$$

WAI se calculó como la relación entre el peso de agua absorbida respecto a la muestra seca teniendo en cuenta las pérdidas solubles en el sobrenadante, método descrito por (Dogan y Karwe, 2003).

$$WAI = \frac{\text{Peso de agua absorbida (g)}}{\text{Peso de muestra seca (1-fracción soluble)(g)}} \quad \text{ec. (3.4)}$$

Capacidad de absorción de agua

La capacidad de absorción de agua (WAC) se determinó siguiendo el método de centrifugación descrito por Sosulski (1962). Se transfirieron 5 g de harina a tubos Falcon

y se añadió 30 mL de agua destilada. La mezcla se agitó con una varilla de vidrio para mantener la harina en suspensión (30 s) y se dejó reposar durante 10 min. Esto se repitió tres veces. Para recuperar la muestra adherida a la varilla se lavó con 10 mL de agua destilada. La muestra se centrifugó a 3000 g durante 25 min. Se decantó el sobrenadante y se secó el exceso de humedad del sedimento en una estufa de convección a 50 °C durante 25 min. El WAC se calculó como:

$$WAC = \frac{\text{Peso de agua en el sedimento (g)}}{\text{Peso de muestra seca (g)}} \quad \text{ec. (3.5)}$$

3.3.5.2 *Análisis reológico de las masas*

Se realizó el análisis reológico de las masas de panqueque elaboradas con las diferentes harinas utilizando un reómetro de stress controlado (MRC 30, Anton Paar Ostfildern, Alemania). El sistema utilizado fue de geometría plato-plato rugoso de 50 mm de diámetro (PP50/S). Se realizó el análisis reológico de las masas de panqueque con las diferentes harinas estudiadas. La temperatura de medida fue de $25 \pm 0,01^\circ\text{C}$ (controlada mediante un sistema Peltier incorporado en el equipo). La masa se dejó reposar durante 10 minutos después de su preparación. Se tomaron 5 gramos de muestra y se colocaron entre las placas y se eliminó el exceso de masa fuera del borde de la placa. Se midieron 5 réplicas de cada muestra para cada tipo de test.

Con el fin de conocer el comportamiento reológicos de las masas en función de la velocidad de deformación se realizaron curvas de flujo en un rango de $0,1$ -a 300 s^{-1} . Se registraron los valores de esfuerzo de cizalla y de viscosidad durante 7,5 min. Los datos se ajustaron al modelo de ley de potencia:

$$\sigma = K \cdot (\dot{\gamma})^n \quad \text{ec. (3.6)}$$

donde σ es el esfuerzo de cizalla (Pa), $\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación (s^{-1}), K es el índice de consistencia ($\text{Pa} \cdot \text{s}^n$) y n es el índice de flujo.

Para estudiar el efecto de la temperatura sobre las propiedades reológicas, se realizaron ensayos rotacionales a una velocidad de calentamiento de $5^\circ\text{C}/\text{min}$ de 25°C a 100°C , con una velocidad de deformación de 200 s^{-1} (seleccionados para garantizar la existencia de un rango lineal de acuerdo con los barridos de velocidad de deformación realizados previamente en los ensayos de curva de flujo). La muestra se cubrió con una

capa de aceite de silicona en el lateral para minimizar la evaporación de la humedad a alta temperatura. Las propiedades de empastado o “pasting” se determinaron utilizando el software Rheoplus a partir de la curva de calentamiento de las masas. En la Figura III- 19 se muestran los índice determinados: viscosidad a 25 °C ($\eta_{25\text{ °C}}$); temperatura de “pasting” (T_p) (temperatura a la que se produce un aumento de la viscosidad); viscosidad a la temperatura de “pasting” (η_{Tp}); viscosidad máxima ($\eta_{\max}$); y, temperatura máxima, ($T_{\eta\max}$) (máxima viscosidad y temperatura en este punto).

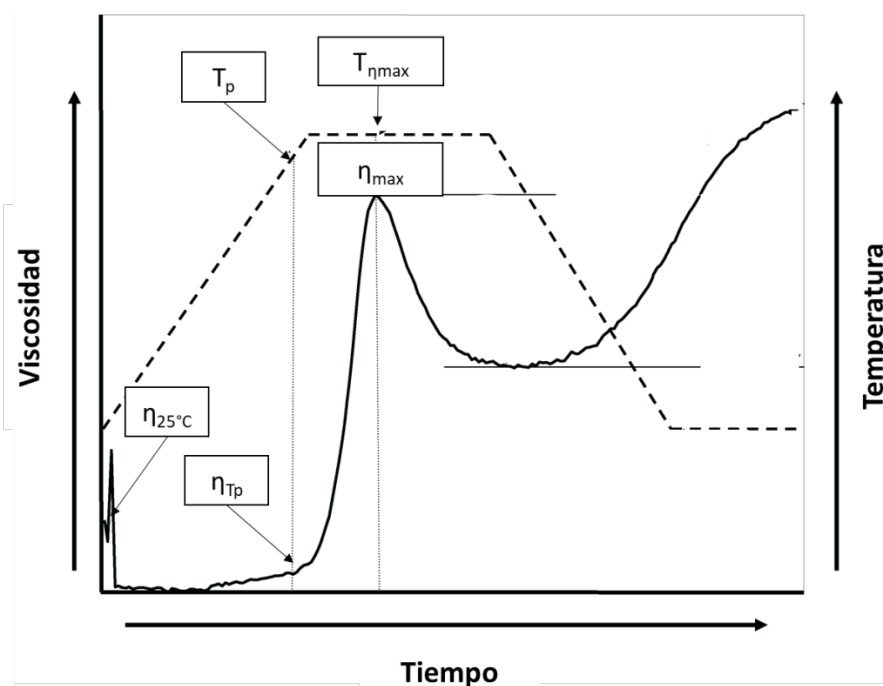


Figura III- 19. Diagrama esquemático de propiedades de pasting.

También se realizaron ensayos de cizallamiento oscilatorio a 25 °C para caracterizar el comportamiento viscoelástico de la masa. Las pruebas de barrido de deformación se llevaron a cabo en el rango de 0,01 a 100 % a frecuencia constante de 3 Hz. Se obtuvieron los parámetros G' (módulo elástico), G'' (módulo viscoso) y el ángulo de fase, δ .

G' es el módulo de almacenamiento o módulo elástico, que es una medida de la energía de deformación almacenada en la muestra durante el proceso de cizalla, y que representa la componente elástica de una muestra. El valor G'' (módulo viscoso) es el módulo de pérdida y es una medida de la energía disipada por la muestra, que representa la componente viscosa. $\tan \delta$ es la relación entre ambos módulos (G''/G'), nos indica el

grado de viscoelasticidad ($\tan \delta > 1$ predominio viscoso; $\tan \delta < 1$, predominio elástico; y $\tan \delta = 1$, 50% elástico y 50% viscoso).

3.3.5.3 Gravedad específica de las masas

La gravedad específica de las masas, SG, se midió como la relación entre el peso de un recipiente estándar lleno de masa y el del mismo recipiente lleno de agua. Todas las mediciones se realizaron al menos por quintuplicado.

3.3.5.4 Análisis de imágenes termográficas

Las imágenes termográficas se adquirieron durante los experimentos en los que se cocinaban los panqueques con el objetivo de confirmar que la sartén había alcanzado la temperatura de inicio de cocción (230 °C), obtener la evolución del perfil de temperaturas en la cara superior del panqueque y proporcionar datos sobre la homogeneidad de temperatura en la sartén que facilitase el análisis de color del panqueque. Para todo ello se empleó una cámara termográfica de la marca TESTO, modelo 875.2 con objetivo angular 32° x 23° y el software TESTO IRsoft para el postprocesado de las imágenes térmicas. El método empleado para capturar las imágenes y procesarlas fue similar al realizado para la carne y expuesto en la sección (3.2.6.5).

3.3.5.5 Análisis de color

Para obtener el color de los panqueques las muestras se escanearon (Scan Lide 210, Canon, Tokio, Japón) tras 10 minutos de reposo, con una resolución de 600 ppp. Durante la digitalización de las muestras éstas se cubrieron con una caja negra. Las imágenes se obtuvieron en un formato JPEG y se procesaron con el software Matrox 8.0 (Matrox Electronic Systems Ltd, Dorval, Canadá). El calibrado del escáner se realizó con patrones de la norma española de colores UNE 48-103-94, correspondientes a las gamas de amarillos y marrones. Las coordenadas de color CIELab se correlacionaron mediante un modelo cuadrático simple con los valores RGB (Leon et al., 2006) utilizando para ello la herramienta Solver de Microsoft Excel.

Para la selección de la región del panqueque en el que se mediría el color se tomó como criterio que en esa región la temperatura de la sartén fuese homogénea. Para ello se utilizó la información proporcionada por las imágenes termográficas. Se tomó una imagen termográfica de la sartén caliente previamente a la adición de la masa de panqueque

(Figura III- 20 derecha) y otra con la masa ya incorporada (Figura III- 20 izquierda). Sobre la imagen de la sartén vacía se marcó la posición que ocuparía el panqueque utilizando como plantilla la imagen termográfica de la sartén con el panqueque. Posteriormente, se determinó el perfil de temperaturas de los ejes vertical (P2) y horizontal (P1) de la zona de la sartén donde estaría el panqueque.

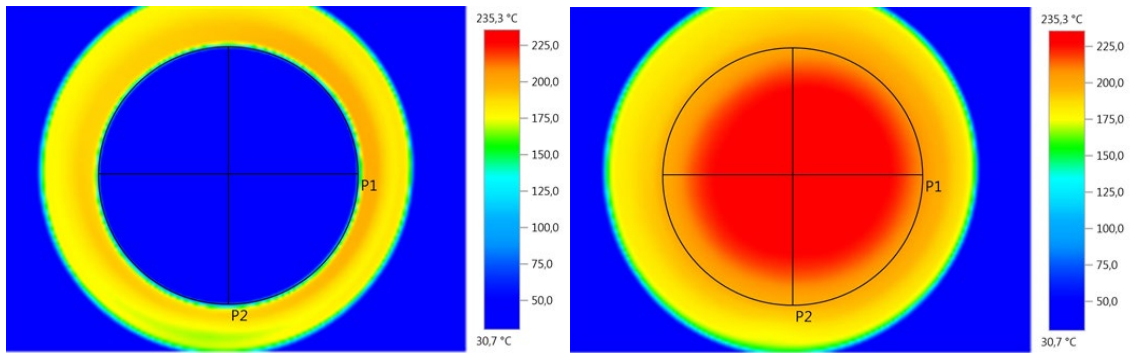


Figura III- 20. Imágenes termográficas de superficie panqueque en sartén (izquierda) y de superficie sartén antes de adicionar masa panqueque (derecha)

En la Figura III- 21 se muestran los perfiles de temperatura para los dos ejes. Como puede observarse hay una zona central en la sartén con temperaturas entre 230 y 236 °C y un arco alrededor de esa región donde la temperatura, se torna más fría cuanto más próxima está la posición a la pared de la sartén. Se seleccionó como ROI esa zona central que para el caso de la Figura III- 21 estaría comprendida entre 29 mm y 134 mm en el eje vertical, y entre 36 mm a 146 mm en el horizontal.

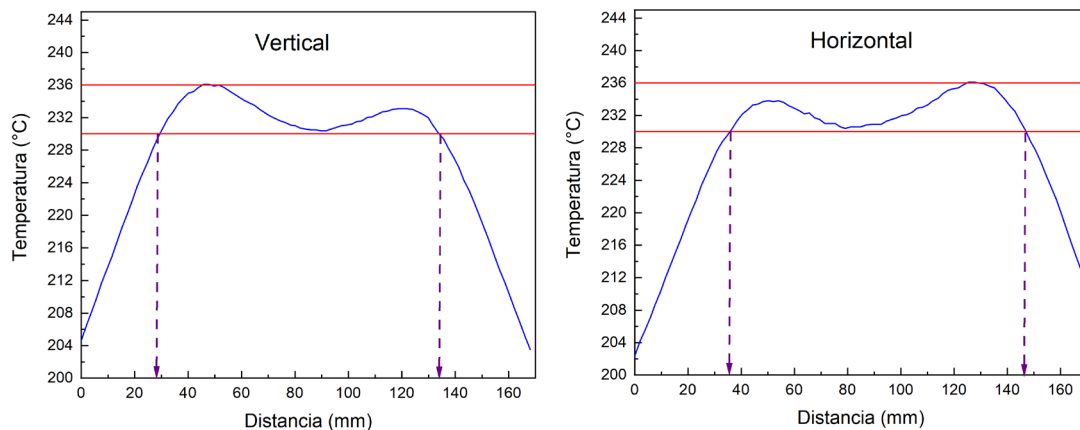


Figura III- 21. Perfil de temperatura de la superficie de la sartén en el eje vertical, P2 (izquierda) y en el eje horizontal, P1 (derecha).

3.4 CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE PASTA POR INMERSIÓN EN AGUA HIRVIENDO

Entre los diversos factores que pueden influir en las características físico-químicas de la pasta cocinada por ebullición en agua, en este estudio se han abordado algunos referentes a las condiciones iniciales de la pasta, como son: la geometría y tamaño de la pasta y su composición. Con respecto a otros factores relacionados con las condiciones de cocinado se ha analizado la influencia del nivel de potencia, de la relación pasta/agua y de la agitación durante el cocinado.

3.4.1 Pasta

Este estudio se realizó con pasta de sémola de trigo duro, concretamente con espaguetis n.5 (Barilla, Italia) y macarrones penne lisce n. 71 (Barilla, Italia). Los espaguetis se cortaron a una longitud de 10 cm antes de su cocción.



Figura III- 22. Pasta utilizada: izquierda, espagueti n.5; derecha, macarrones penne lisce. n.71.

Dentro de los espaguetis n.5 se evaluaron dos tipos de espaguetis: espaguetis gruesos (diámetro $1,73 \pm 0,03$ mm) y espagueti fino (diámetro $1,61 \pm 0,01$ mm). Estos espaguetis venían empaquetados ambos como espagueti n. 5, pero presentaron diferente diámetro y el fabricante también indicaba diferente tiempo óptimo de cocción.

La composición nutricional promedio indicada en el etiquetado por los fabricantes de estos productos, queda recogida en la Tabla III- 7. Ambos productos tienen una composición similar, diferenciándose en que los macarrones tienen un 0,3 % más de hidratos de carbono y un 0,3 % menos de proteínas.

Tabla III- 7. Composición nutricional de la pasta utilizada por 100 g de producto.

Producto	Espaguetis	Macarrones
Valor energético	359 kcal	359 kcal
Grasas	2 g	2 g
Grasas saturadas	0,5 g	0,5 g
Hidratos de carbono	70,9 g	71,2 g
Azúcares	3,5 g	3,5 g
Fibra	3,0 g	3,0 g
Proteína	12,8 g	12,5 g
Sal	0,013 g	0,013 g

3.4.2 Sistema experimental y condiciones de cocinado de la pasta

Estos ensayos se realizaron utilizando la placa de inducción Bosch Schott Ceran PXY675DW4E/01 con la función de control de temperatura desactivada. Se establecieron dos potencias para la cocción de la pasta ya que se quería conocer cómo influye la vigorosidad de la ebullición en las propiedades de la pasta cocida: una potencia baja (P1) pero suficiente para mantener el hervor (nivel 6.5, que corresponde a una potencia de 573 W) y una potencia alta (P2) (nivel 9, que corresponde a una potencia de 1290 W). La pasta se coció en una olla Oumbärlig (IKEA Delft, Holanda), de acero inoxidable/aluminio, con una capacidad de 4 L (13 cm de alto y 20 cm de diámetro).

La pasta se cocinó durante el tiempo óptimo marcado por el fabricante que fueron 9 min para los espaguetis gruesos, 8 min para los espaguetis finos y 8 min también para los macarrones. En el caso de los espaguetis el tiempo recomendado por el fabricante coincide con el tiempo óptimo de cocción establecido por el método AACC 66-50.01 (AACC, 1989).

Previamente a la realización de otros ensayos se caracterizó el medio de cocción para los dos niveles de potencia. Para ello se realizaron cocciones con el nivel 9 y el nivel 6.5 en los que se registró la temperatura del fondo de la olla, mediante un termopar de superficie tipo K, y en el agua de cocción a 2,5 cm del fondo de la olla, mediante un termopar tipo T de 1,5 mm de diámetro (Figura III- 23), los datos se registraron con un Data Logger 1476T4 (Testo. Lenzkirch, Alemania).

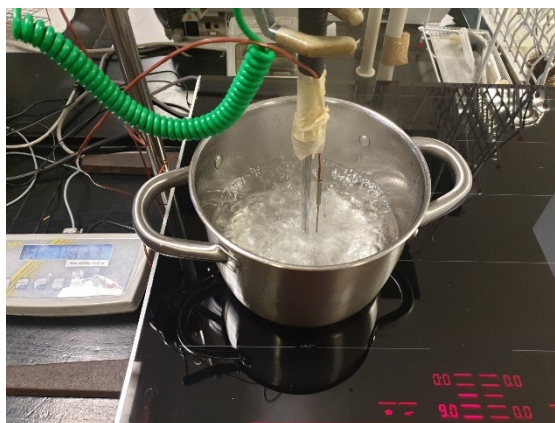


Figura III- 23. *Cocción de pasta a potencia alta registrando la temperatura en el fondo de la olla y a 2,5 cm del fondo.*

Las condiciones para realizar esta caracterización son similares a las que posteriormente se utilizaron para los demás ensayos. Tras el encendido de la placa se seleccionaba la opción *boost* (máximo nivel de potencia) para calentar 1 L de agua en la olla y una vez que alcanza el punto de ebullición se cambiaba a la potencia correspondiente y se incorporaba la pasta a la olla en una proporción de 100 g de pasta por litro de agua. Las cocciones se llevaron a cabo con agua de mineralización muy débil, 0,027 g/L de residuo seco (Bezoya, Segovia, España). Las cocciones se realizaron sin tapa y sin agitación.

Para cada condición se cocieron 3 lotes de pasta. La pasta cocida se caracterizó mediante las siguientes propiedades, conocidas como propiedades de cocción: pérdidas por cocción, índice de absorción de agua, índice de hinchamiento, incremento de volumen y el grado de gelatinización del almidón. Además, se analizó la textura de la pasta mediante análisis instrumental y se determinó el aumento en las dimensiones de la pasta mediante análisis digital de imágenes obtenidas con un escáner. El agua de cocción se caracterizó también midiendo su turbidez. En la sección (3.4.4) se muestra la descripción detallada de estos análisis.

3.4.3 Ensayos de cocinado de la pasta

3.4.3.1 Ensayos para analizar la influencia de la potencia en las propiedades de la pasta

El objetivo de estos ensayos fue estudiar cómo la cocción con diferentes potencias (P1 y P2) podía afectar a las propiedades de la pasta, pero no solamente en cuanto a las

propiedades finales tras la cocción, sino también en cuanto a su evolución durante el proceso de cocción. Por ello se caracterizó la pasta a diferentes tiempos de cocción (2, 4, 6, 8 y 10 min).

3.4.3.2 Ensayos para analizar la repercusión de la relación pasta/agua y de la agitación en las propiedades de la pasta

El objetivo de estos ensayos fue estudiar la influencia de remover la pasta durante el cocinado. Para ello se realizaron ensayos similares en los que en unos se realizaba una agitación durante 1 min tras echar la pasta a la olla y en otros no. Posteriormente se realizó un estudio comparativo de las propiedades de la pasta tras estas cocciones.

También se realizó un estudio para comprobar si la relación agua/pasta es un factor que influye en las propiedades de la pasta cocida. Para ello se hizo un estudio comparativo entre las propiedades de la pasta cocida con una relación 100g de pasta por litro de agua con las de la pasta cocida con una relación de 100 g de pasta por 0,6 L de agua. Esta última relación pasta/agua se determinó teniendo en cuenta el índice de absorción de agua por la pasta y la velocidad de evaporación del agua. Una cantidad menor de agua no aseguraba que la pasta tuviese agua disponible para hidratarse durante la cocción. Todos los ensayos se realizaron para las dos potencias (P1 y P2).

3.4.3.3 Ensayos para analizar la influencia de la composición en las propiedades de la pasta cocida

El objetivo de estos ensayos fue estudiar en qué medida la composición de la pasta afecta a las propiedades de la pasta cocida cuando se cocina en similares condiciones independientemente de la composición. Para ello se seleccionaron tres matrices de pasta diferentes: espaguetis de sémola de trigo *durum* refinado n. 5 de diámetro $1,73 \pm 0,03$ mm (Barilla, Italia), espaguetis integrales de sémola de trigo *durum* de grano entero n. 5 de diámetro $1,74 \pm 0,01$ mm (Barilla, Italia) y espaguetis sin gluten de diámetro $1,69 \pm 0,01$ mm (Andriani spa, Italia). Los ingredientes de los espaguetis sin gluten eran: harina de maíz (55%), harina de arroz (refinada e integral) (41,5%), harina de quínoa (3%), emulgente mono y diglicéridos de ácidos grasos.



Figura III- 24. *Espaguetis refinados, integrales, y sin gluten (en orden de izquierda a derecha).*

La composición nutricional promedio, tal y como la especifican los fabricantes de estos productos se muestra en la Tabla III- 8. Cabe destacar el mayor contenido en fibra de la pasta integral y su menor contenido en hidratos de carbono con respecto a la pasta refinada. En cuanto a la pasta sin gluten, ésta tiene un mayor contenido en hidratos de carbono y un menor contenido en proteínas y fibra que la pasta con gluten.

Se cocieron 100 g de pasta en 1 L de agua con las dos potencias P1 y P2. Los tiempos de cocción fueron los recomendados por el fabricante, 9 min para los tres tipos de pasta.

Tabla III- 8. *Composición nutricional de la pasta utilizada para estudio por 100 g de producto*

<i>Producto</i>	<i>Espagueti refinado</i>	<i>Espagueti integral</i>	<i>Espagueti sin gluten</i>
Valor energético	359 kcal	347 kcal	355 kcal
Grasas	2 g	2,5 g	2 g
Grasas saturadas	0,5 g	0,5 g	0,7 g
Hidratos de carbono	70,9 g	64,0 g	76,0 g
Azúcares	3,5 g	3,5 g	0,5 g
Fibra	3,0 g	8,0 g	2,5 g
Proteína	12,8 g	13,0 g	7,3 g
Sal	0,013 g	0,013 g	<0,01 g

En este caso además de las propiedades de cocinado y de textura, se quiso averiguar si la cocción a diferente potencia podía tener un efecto en las propiedades nutricionales de la pasta y por ello se analizó el almidón resistente y el almidón digerible siguiendo el protocolo que se indica en la sección (3.4.5).

3.4.4 Análisis físico-químico de la pasta

3.4.4.1 Propiedades de cocinado de la pasta

Tiempo óptimo de cocinado (OCT)

Se determinó el tiempo óptimo de cocinado para el espagueti mediante el método descrito en el método 66-50.01 de la American Association of Cereal Chemists (AACC, 1989). Se extrajeron muestras de pasta cada 30 segundos durante la cocción y se comprimieron entre dos piezas de metacrilato transparente como se muestra en la Figura III- 25. La desaparición del núcleo central indica el tiempo óptimo de cocción. Se realizaron tres réplicas por muestra.

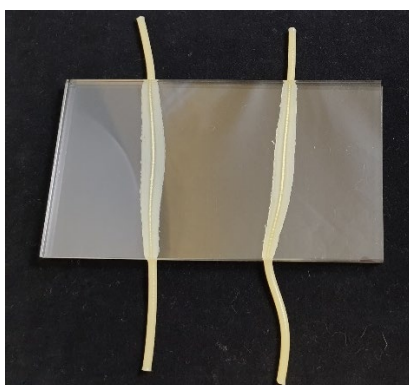


Figura III- 25. Determinación del tiempo óptimo de cocción para espaguetis.

Pérdidas por cocción (CL)

Se evaluó siguiendo el protocolo descrito en el método 66-50.01 (AACC, 1989), con ligeras modificaciones, determinándose la cantidad de sólidos en el agua de cocinado. El agua de cocción que queda tras la cocción se transfirió a una probeta y se añadió el volumen de agua evaporada durante la cocción y se volvió a medir el volumen de agua. Se homogeneizó por agitación, se tomaron muestras de 10g y se sometieron a secado en estufa (12h) a 105 °C. El residuo se pesó y el contenido de materia seca de agua de pasta se refirió a la masa inicial de pasta (Bustos et al., 2015; Debbouz y Doetkott, 1996; Espinosa-Solis et al., 2019). Se realizaron cinco réplicas por muestra.

$$CL (\%) = \left(\frac{\text{Peso de residuo seco en agua de cocción (g)}}{\text{Peso pasta sin cocer (g)}} \right) \times 100 \quad \text{ec. (3.7)}$$

Índice de hinchamiento (SI)

El índice de hinchamiento es un parámetro que indica la integridad de la matriz de proteínas que restringe la penetración del agua. Se determinó secando las muestras de pasta cocida a 105 °C durante 12h y expresando el resultado como gramos de agua por gramo de pasta seca (Tudorica et al., 2002). Se realizaron cinco réplicas por muestra.

$$SI (\%) = \left(\frac{\text{Peso pasta cocida (g)} - \text{Peso pasta seca (g)}}{\text{Peso pasta seca (g)}} \right) \quad \text{ec. (3.8)}$$

Índice de absorción de agua (WAI)

La cantidad de agua absorbida por la pasta cocinada está asociada con el hinchazón del almidón y la gelatinización y se determina como el porcentaje de aumento de peso en relación con la pasta sin cocinar (Bustos et al., 2015; Tudorica et al., 2002). Se realizaron cinco réplicas por muestra.

$$WAI(\%) = \left(\frac{\text{Peso pasta cocida (g)} - \text{Peso pasta sin cocer (g)}}{\text{Peso pasta sin cocer (g)}} \right) \times 100 \quad \text{ec. (3.9)}$$

Incremento de volumen (VE)

Se añadieron 10 g de pasta sin cocer a 70 ml de agua destilada en una probeta de 100 mL, y el aumento de volumen se registró como el volumen inicial. La pasta se coció en 100 mL de agua hasta el tiempo de cocción óptimo. La pasta cocida se añadió nuevamente a 70 mL de agua contenida una probeta de 100 mL, se registró el incremento de volumen y se expresó como mL/g (Surasani et al., 2019). Se realizaron cinco réplicas por muestra.

$$VE (\text{mL/g}) = \left(\frac{\text{Volumen pasta cocida (mL)} - \text{Volumen pasta sin cocer (mL)}}{\text{Peso pasta sin cocer (g)}} \right) \quad \text{ec. (3.10)}$$

3.4.4.2 Grado de gelatinización del almidón (G)

El grado de gelatinización del almidón se determinó mediante el método químico propuesto por Wootton y Chaudhry (1980) y modificado por Dalla Rosa et al. (1989). El grado de gelatinización se expresó como la relación entre el almidón gelatinizado y el almidón total en pasta cocida. Se calculó por la medida colorimétrica del complejo almidón-yodo formado en suspensión acuosa de muestra tomadas antes y después de la gelatinización completa del almidón. La pasta cocida se dividió en dos submuestras de

2 g cada una (A y B). La muestra A se homogeneizó con agua desionizada (100 mL) durante 10 usando un ultraturrax (IkaWerke, Staufen, Germany). Después se centrifugó a 3600 rpm durante 20 min. Se extrajo 1 mL de la fase líquida y se diluyó con 10 mL de agua desionizada y se añadió 0,1 mL de solución de yodo (preparado con 4 g de yoduro de potasio y 1 g de yodo en 100 mL de agua destilada). La muestra B se preparó como la muestra A, pero la muestra de pasta se trató térmicamente a 135 °C en autoclave durante 1h para alcanzar la gelatinización completa. La absorbancia se midió con un espectrofotómetro a 600 nm (Unicam UV-500, Thermospectronic, Leeds, UK). El grado de gelatinización se calculó a partir de la relación:

$$\text{Grado gelatinización (\%)} = \left(\frac{\text{Absorbancia muestra A}}{\text{Absorbancia muestra B}} \right) \times 100 \quad \text{ec. (3.11)}$$

3.4.4.3 Materia orgánica total (TOM)

La materia orgánica total la definieron D'Egidio et al. (1982) como aquella determinada por el método químico de determinación cuantitativa de la materia orgánica total del agua de lavado de la superficie de la pasta, que posteriormente fue modificado por Dexter et al. (1985). El método se basa en lavar la pasta escurrida con 500 mL de agua a temperatura ambiente para eliminar las sustancias que recubren la superficie de la pasta cocida. Una parte alícuota de agua de lavado se evapora a 80 °C en una estufa. La materia orgánica en el residuo se determina mediante valoración con sulfato de amonio ferroso en un exceso de dicromato de potasio utilizando solución de difenilamina como indicador. Los valores de materia orgánica total se expresaron como gramos de almidón por 100 g de pasta. Los mL de sal ferrosa utilizados en la valoración se apuntan y se les denominará S. Se vuelve a hacer la valoración de la misma manera, pero sin la materia orgánica del agua de lavado. Los mL de sal ferrosa utilizados en la valoración sin materia orgánica se apuntan y se les denominará B. Con estos valores la materia orgánica total se cuantificó con la siguiente ecuación:

$$\text{TOM (g /100 g de pasta)} = N_{\text{Sal ferrosa}} (B-S) \cdot 0,694087 \quad \text{ec. (3.12)}$$

Donde: $N_{\text{sal ferrosa}}$ es la normalidad calculada tras la valoración de sal ferrosa, 0.694087 es el factor calculado para la transformación de glucosa a almidón y es necesario tener en cuenta el factor de dilución. Se realizaron tres réplicas por muestra.

3.4.4.4 Turbidez del agua de cocción (T)

Se determinó la turbidez del agua de cocción mediante un turbidímetro portátil Hach model 2100PISO (Hach Company, Loveland, Colorado). El turbidímetro se calibró diariamente con unos patrones de calibración de formacina suministradas por el fabricante. Tras la cocción de la pasta, el agua de cocción que queda se transfiere a una probeta y se añadió el volumen de agua evaporada durante la cocción. Se dejó enfriar el agua hasta temperatura ambiente, se agitó y se procedió a medir la turbidez del agua de cocción. Se realizaron cinco réplicas por muestra.

3.4.4.5 Textura

La textura de la pasta se caracterizó mediante ensayos de corte y de compresión utilizando el texturómetro TA.XT.plus Texture Analyzer (Stable Micro Systems, Godalming, UK) en las condiciones que se detallan en la Tabla III- 9. Para estos test se utilizaron sondas específicamente diseñadas para la evaluación de la textura de la pasta y que se muestran con detalle en la Figura III- 26.

Tabla III- 9. Condiciones de los ensayos de textura de las distintas matrices analizadas.

<i>Producto y referencia</i>	<i>Preparación de la muestra</i>	<i>Tipo de test y parámetro determinado</i>	<i>Célula de carga</i>	<i>Tipo de sonda</i>	<i>Velocidad y distancia</i>
Pasta (AACC, 1989)	5 unidades de pasta 12 réplicas	Corte Fuerza máxima Compresión	5 Kg	Sonda A/LKB	0,17mm/s 0,5mm de la base
Pasta (Diamante et al., 2019)	5 unidades de pasta 12 réplicas	Compresión Pegajosidad	5 kg	Sonda HDP/PFS	0,5 mm/s 1 Kg durante 2s

Tras el cocinado, las muestras se dejaron reposar a temperatura ambiente durante 10 min en un recipiente tapado. Además, para el ensayo de firmeza, la pasta cocida se enjuagó con 700 mL de agua fría, siguiendo las indicaciones de (Diamante et al., 2019).

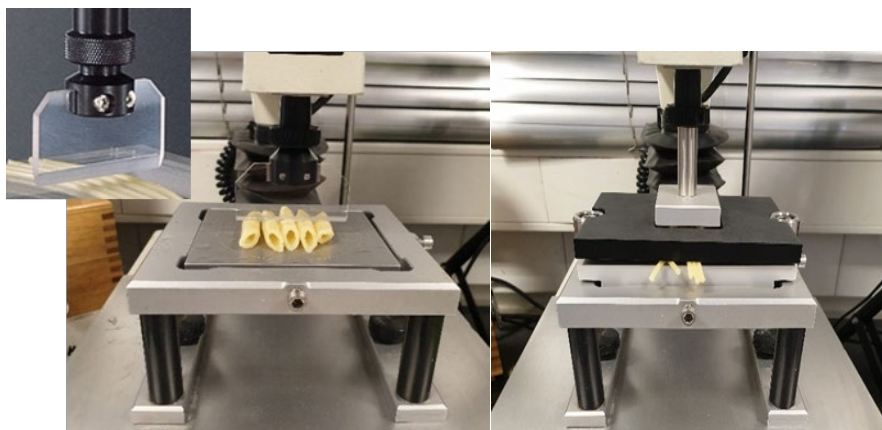


Figura III- 26. Ensayo de corte (izda) con sonda A/LKB (método AACC 66-50.01) y ensayo de compresión (dcha) con sonda HDP/PFS para caracterizar la textura de la pasta.

3.4.4.6 Análisis digital de la imagen

Para estudiar la evolución de las dimensiones de la pasta durante el cocinado se tomaron muestras a diferentes tiempos de cocción y posteriormente se escanearon con una resolución de 600 ppp (Scan Lide 210, Canon, Tokio, Japón) cubriendo las muestras con una caja negra.

Las imágenes se obtuvieron en un formato JPEG y se procesaron con el software Matrox 8.0 (Matrox Electronic Systems Ltd, Dorval, Canadá), Figura III- 27. Tanto para los macarrones como los espaguetis se pusieron 10 unidades en posición horizontal con el fin de obtener la longitud y otras 10 unidades cortadas transversalmente obteniendo muestras de unos 2 mm de altura, con el fin de obtener el área.

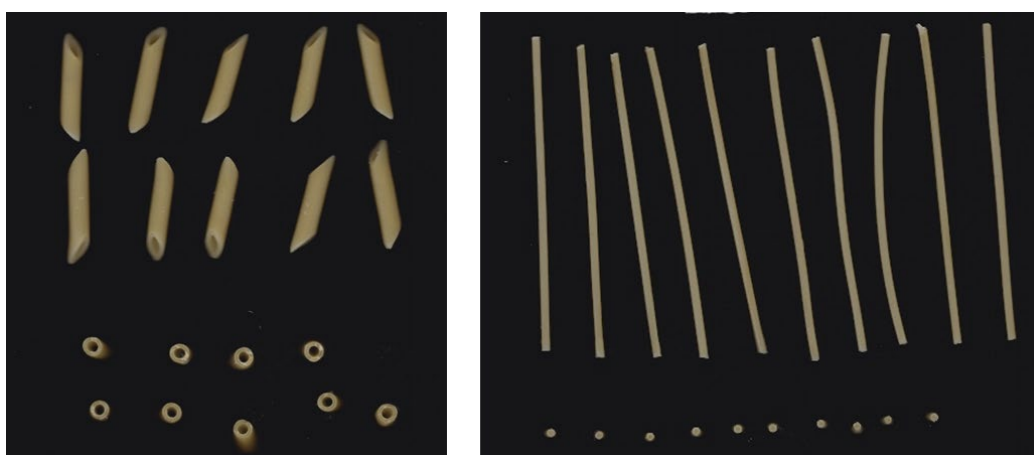


Figura III- 27. Imagen escaneada de macarrón (izquierda) y de espagueti (derecha).

El tratamiento de la imagen consistió primeramente en una calibración para convertir los ppp a mm. Posteriormente se seleccionó la región de interés (ROI) de la

imagen y se convirtió a formato de 8 bit Unsigned (escala de grises). Mediante la segmentación de la imagen aplicando un umbral adecuado se determinó el área y longitud de la pasta. Para el caso del macarrón el área transversal se obtuvo mediante la diferencia del área del círculo exterior con el del interior (Figura III- 28).

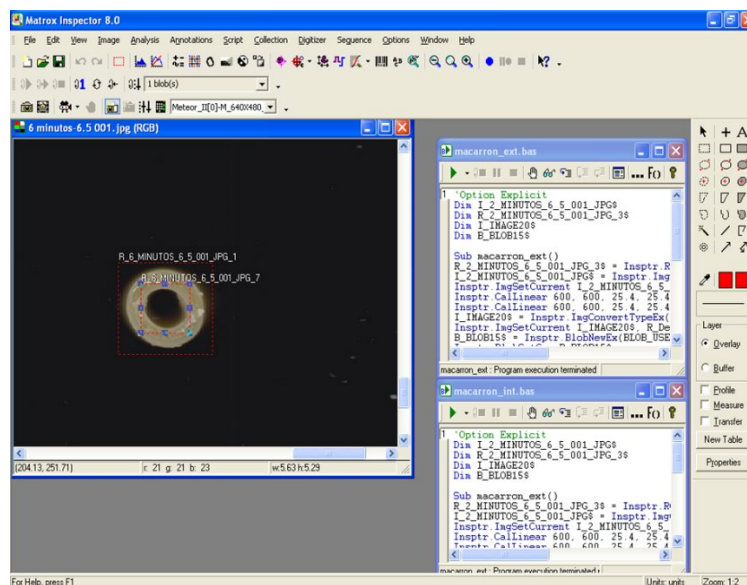


Figura III- 28. Obtención con el software Matrox el área transversal del exterior e interior del macarrón.

3.4.5 Contenido en almidón resistente

El contenido en almidón resistente se analizó mediante el Kit enzimático Megazyme (K-RAPRS 11/19). Este método es una actualización del método de McCleary et al. (2002) (método AOAC 2002.02, método AACC 32-40.01). La mezcla de enzimas empleada (α -amilasa pancreática (PAA) y amiloglucosidasa (AMG)) es la utilizada por Englyst et al. (1992) excepto que ambas enzimas han sido purificadas, estandarizadas y estabilizadas. La digestión se realiza utilizando niveles de saturación de PAA y AMG con agitación a pH 6 y 37 °C durante 4 h, para simular las condiciones in vivo en el intestino delgado humano. Durante ese tiempo el almidón digerible se hidroliza y solubiliza pasando a D-Glucosa por la acción combinada de las dos enzimas. La muestra se centrifugó dos veces con etanol y de esta forma se detuvo la reacción de hidrólisis. Se separó en el sobrenadante el almidón digerible (DS) y en el precipitado el almidón resistente (RS). El almidón resistente en el precipitado se trató con NaOH 1,7 M en agitación vigorosa en frío. Posteriormente, a esta solución se le adicionó acetato sódico 1 M para neutralizar el pH, y el almidón resistente se hidrolizó cuantitativamente a

D-Glucosa con la adición de AMG. Posteriormente, se hizo reaccionar con el reactivo GOPOD (reactivo con glucosa oxidasa/peroxidasa) en un baño a 50 °C durante 20 min, produciéndose una reacción colorimétrica. La determinación cuantitativa se llevó a cabo con un espectrofotómetro (Unicam UV- 500, Reino Unido) a una longitud de onda de 510 nm. Para determinar la concentración de almidón resistente, se toma como referencia la absorbancia a la misma longitud de onda de una concentración conocida de D-glucosa libre que actúa con el GOPOD. El almidón digerible se determinó a partir del sobrenadante, se hidrolizó con la AMG durante 30 min a 50 °C, a continuación, se añadió el reactivo GOPOD y dejó reaccionar de nuevo 20 min a 50 °C. Posteriormente se determinó la concentración a partir de la absorbancia medida a 510 nm utilizando la misma referencia que para el almidón resistente. El almidón total se obtiene por la suma de la fracción digerible (DS) y no digerible (RS). Se realizaron cinco réplicas para cada muestra.

3.5 CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE VEGETALES POR INMERSIÓN EN AGUA HIRVIENDO

La cocción por inmersión en agua hirviendo suele ser uno de los métodos con el que los vegetales retienen menos nutrientes, por la degradación térmica de los mismos o por su lixiviación al agua de cocción (Pellegrini et al., 2010). Sin embargo, sigue siendo un método de cocinado muy utilizado (Clarke y Evans, 2016). Por ello es interesante intentar reducir las pérdidas nutricionales asociadas a este método de cocción. La temperatura no es un parámetro modificable en la cocción mediante inmersión en agua hirviendo ya que a nivel doméstico el hervor se realiza como poco a presión atmosférica. Por otra parte, el tiempo que limitaría las pérdidas es insuficiente como para modificar adecuadamente la textura de los vegetales según revelan los estudios realizados al respecto (Podsdek et al., 2008). Por lo tanto, se postula si la intensidad de la ebullición puede afectar a la retención de nutrientes, es decir, si el número, tamaño y distribución de las burbujas de vapor que se generan pueden afectar al mecanismo de lixiviación de los nutrientes. Con este estudio se pretendió verificar si la potencia suministrada durante el hervido puede afectar a las propiedades organolépticas y nutricionales de los vegetales y cuantificar su influencia.

3.5.1 Vegetales

Para este estudio se seleccionaron vegetales que generalmente se consumen cocidos y que forman parte de la dieta habitual: brócoli (*Brassica oleracea* L. cv. Parthenon), acelga (*Beta vulgaris* var. cicla), judía verde (*Phaseolus vulgaris* L. cv. Perona) y alcachofa (*Cynara scolymus* L. cv. Blanca de Tudela). Todos los vegetales utilizados se adquirieron en supermercados locales. Desde su compra se almacenaron en refrigeración evitando que transcurriesen más de dos días antes de su uso. La preparación del producto y el tiempo de cocción que se llevó a cabo para cada vegetal se detallan en la Tabla III-10.

Tabla III- 10. Preparación del producto y tiempo de cocción de los vegetales.

Producto	Preparación de la muestra	Tiempo cocción
Brócoli	Corte en floretes de unos 50 g de peso	15 min
Acelga	Corte en tiras de 30 mm de longitud	10 min
Judía verde	Corte en trozos de 30 mm de longitud	15 min
Alcachofa	Limpieza del tallo completo y cortadas en mitades	30 min

3.5.2 Sistema experimental y condiciones de cocinado

Este estudio se ha realizado utilizando la placa de inducción Bosch Schott Ceran PIB375FB1E (BSH, Munich, Alemania). Los vegetales se cocinaron utilizando la olla Oumbärlig (IKEA Delft, Holanda), de acero inoxidable/aluminio, con una capacidad de 6 L (15 cm de alto y 23 cm de diámetro). La metodología utilizada fue la misma para todos los vegetales: se llevaron a ebullición 1,5 L de agua del grifo (240 g/L de CO_3Ca) utilizando la máxima potencia de la placa (3700 W, usando la función booster), momento en el que se introdujeron 150 g de vegetales en la olla y cuando el agua volvió de nuevo a hervir la potencia se redujo al valor deseado para el experimento.

3.5.3 Ensayos de cocinado de los vegetales

Los experimentos se llevaron a cabo a las potencias efectivas de 753, 1087, 1610 y 2010 W (correspondientes a los niveles 7, 8, 8.5 y 9), calculadas como el producto de

la velocidad de evaporación del agua a 100 °C (Tabla III- 2) por el calor latente de evaporación. Las cocciones se realizaron con la olla sin tapa.

Tras la cocción los vegetales se escurrieron durante 1 min antes de la realización de los análisis de caracterización físicoquímica, en los que se determinó el color, la textura y el contenido en humedad. También se hicieron determinaciones de componentes y parámetros relevantes a nivel nutricional como el contenido total de fenoles, la capacidad antioxidante y la degradación de pigmentos (contenido en clorofilas). En este caso, la evolución durante el cocinado de la conductividad eléctrica del agua de cocción fue un parámetro a analizar como indicador del proceso de lixiviación. Todos los ensayos se realizaron por triplicado.

3.5.4 Análisis físico-químico

3.5.4.1 Humedad

Se pesaron de 2 a 5 g de producto según el caso y se llevaron a la estufa de convección (Digitronic JP Selecta, España) durante 24 h a 105 °C. Tras el proceso de secado en estufa, las muestras se enfriaron en un desecador y se pesaron hasta obtener un peso constante. La humedad se determinó por diferencia de pesada y se expresó en g agua/100 g producto húmedo, a partir de los datos obtenidos de cinco réplicas para cada condición.

3.5.4.2 Textura

La textura de los vegetales se caracterizó mediante ensayos de corte utilizando el texturómetro TA.XT.plus Texture Analyzer (Stable Micro Systems, Godalming, UK) dotado de su correspondiente software (Texture Expert, Stable Micro Systems, Godalming, UK). Los parámetros de textura analizados y el procedimiento de análisis para cada producto se detallan en la Tabla III- 11.

Tabla III- 11. Condiciones de los ensayos de textura de las distintas matrices analizadas.

<i>Producto y referencia</i>	<i>Preparación de la muestra</i>	<i>Tipo de test y parámetro determinado</i>	<i>Célula de carga</i>	<i>Tipo de sonda</i>	<i>Velocidad y distancia</i>
Brócoli (Guillén et al., 2017)	Corte transversal 10 réplicas	Corte Fuerza máxima	5 Kg	Warner-Bratzler	1 mm/s 50 mm
Acelga (Modificado)(Kang y Song, 2021)	Corte transversal 10 réplicas	Corte Fuerza máxima	5 Kg	Warner-Bratzler	1 mm/s 20 mm
Judía verde (Guillén et al., 2017)	Corte transversal 10 réplicas	Corte Fuerza máxima	5 Kg	Warner-Bratzler	1 mm/s 20 mm
Alcachofa (Guillén et al., 2017)	Corte transversal 10 réplicas	Corte Fuerza máxima	30 Kg	Warner-Bratzler	2 mm/s 50 mm

3.5.4.3 Color

Las medidas de color en los vegetales se realizaron con un espectroradiómetro IS CAS 140 (Instrument System, Munich, Alemania), equipado con una sonda TOP 100 y una lente macro Nikkor 200 mm f/4 (Tochigi Nikon Corporation, Tochigi, Japón). Los espectros se midieron entre 360 y 900 nm cada 24 ms. A partir de estos espectros, las coordenadas CIELab se calcularon utilizando el observador estándar CIE64 y el iluminante D65. Se llevaron a cabo 10 réplicas por cada determinación.

3.5.4.4 Contenido en clorofilas

El contenido en clorofila se midió de acuerdo con el método AOAC 942.02 (AOAC, 2002b). Se pesaron por duplicado 15 g de muestra y se añadieron 25 mL de acetona (80% v/v) y 0,1 g de CaCO₃. Se homogeneizó en Ultra-turrax durante 2 min. Se realizó una re-extracción después de una centrifugación a 4000 rpm durante 10 min. Ambos sobrenadantes se diluyeron a 50 mL con acetona (80% v/v). Los contenidos totales de clorofila y clorofila a y b se obtuvieron a partir de mediciones espectrofotométricas a absorbancias de 645 y 663 nm utilizando un espectrofotómetro Unicam UV-500 (ThermoSpectronic, Leeds, UK) y las ecuaciones de Arnon (1949) (Tabla III- 12). Los resultados se expresaron como mg/g de materia seca. Se realizaron las determinaciones por triplicado.

Tabla III- 12. Ecuaciones utilizadas para la cuantificación del contenido en clorofilas.

Clorofila total (mg/L extracto)	$8,02 A_{663} + 20,21 A_{645}$
Clorofila a (mg/L extracto)	$12,7 A_{663} - 2,69 A_{645}$
Clorofila b (mg/L extracto)	$22,9 A_{645} - 4,68 A_{663}$

3.5.4.5 Medida de la conductividad eléctrica del agua de cocción de los vegetales

Se determinó la conductividad eléctrica del agua de cocción durante la ebullición de las verduras. Las medidas se realizaron a 23 °C, utilizando 40 mL de agua con un medidor de conductancia GLP Crison 32 (Hach Lange España, SLU, L'Hospitalet de Llobregat). Previo al análisis de las muestras, se añadió la cantidad de agua necesaria para compensar las pérdidas de agua por evaporación durante la cocción. Para ello se tuvieron en cuenta las siguientes velocidades de evaporación: 0,8908, 0,7135, 0,4817 y 0,3337 g/s para potencias de calefacción suministradas de 2098, 1676, 13135 y 920 respectivamente. El aumento de conductividad se determinó en relación a la del agua del grifo; la conductividad se expresó como percentiles en relación al aumento obtenido en muestras esterilizadas en autoclave durante 30 min (Sharom et al., 1994).

3.5.5 Análisis de parámetros relacionados con el valor nutricional

3.5.5.1 Contenido en fenoles totales

Para la cuantificación del contenido en fenoles totales se llevó a cabo una reacción colorimétrica de óxido-reducción utilizando como agente oxidante el reactivo de Folin-Ciocalteu (Singleton et al., 1999). Se pesó 1 g de la muestra y se añadieron 10 mL de metanol:agua (80:20 v/v) y se homogeneizó la mezcla en un Ultraturrax (Ika-Werke DI 25 Basic yellow line, Alemania). Posteriormente, a 1 mL del extracto obtenido se adicionó 1 mL del reactivo Folin-Ciocalteu (PanReac AppliChem), 1 mL de carbonato sódico (PanReac AppliChem) al 7,5% (p/v), y se llevó a un volumen final de 10 mL con agua destilada. Se dejó en oscuridad y temperatura ambiente durante 1 h para que se produjese la reacción colorimétrica. Posteriormente se llevó a cabo la determinación en espectrofotómetro (Unicam UV- 500, Reino Unido) a una longitud de onda de 760 nm. Se realizó una curva de calibrado de ácido gálico (Sigma-Aldrich) cada día de análisis; el rango de concentraciones de la curva patrón fue de 0 a 200 mg/L. Los resultados se

expresan como mg equivalentes de ácido gálico (mg GAE)/100 g de producto en base seca y corresponden a los valores medios de tres réplicas.

3.5.5.2 Capacidad antioxidante

En todos los vegetales estudiados se determinó la capacidad antioxidante total. Se siguió el método propuesto por Gil et al. (2000) y Llorach et al. (2004), basado en la capacidad antioxidante del conjunto de compuestos antioxidantes presentes en la muestra frente a la acción del radical libre DPPH (2,2- difenil-1-picrilhidrazilo). El DPPH presenta una coloración morada que pasa a amarillo al reaccionar con los antioxidantes. La reacción colorimétrica se mide por espectrofotometría. Para realizar la recta patrón se utiliza el antioxidante Trolox (ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcromano-2-carboxílico) que es un derivado de la vitamina E y se utiliza como referencia para calcular la capacidad antioxidante de la muestra. A 1 g de muestra homogénea se le añadieron 4 mL de solución metanol:agua 50:50 (v:v) y se homogeneizó con un Ultraturrax (Ika-Werke, DI 25 Basic, yellow line, Alemania). Se incubó en baño termostático durante 30 min a 90 °C y posteriormente se enfrió en hielo durante 5 min. La muestra se centrifugó durante 10 min a 4000 rpm y 4 °C y se recuperó el sobrenadante. El proceso de extracción se repitió una segunda vez, combinando posteriormente los sobrenadantes llevándose finalmente a un volumen total de 10 mL con metanol:agua (50:50 v/v). 900 µL del extracto se mezclaron con 900 µL de DPPH (Sigma) y se dejó en oscuridad a temperatura ambiente durante 2,5 h para que se produjese la reacción colorimétrica. La actividad antioxidante se determinó midiendo la absorbancia a una longitud de onda de 515 nm en un espectrofotómetro (Unicam UV-500, Reino Unido). La recta de calibrado se realizó con disoluciones estándar de Trolox (0-60 µM) (Sigma) y los resultados se expresaron como mg equivalentes de Trolox/100 g de producto en base seca. La determinación se realizó por triplicado.

3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realizó un análisis estadístico de varianza (ANOVA) para determinar la significancia de las distintas variables estudiadas en cada caso. Se consideraron significantes con un nivel de probabilidad $p < 0,05$. También se realizó un post-test de Duncan para determinar que muestras eran diferentes entre sí con un nivel de confianza del 95 %. Adicionalmente

se utilizó el método LSD (mínima diferencia significativa) de Fisher como método de comparación de diferencias de medias. Las diferencias significativas se indicarán con letras diferentes en figuras y tablas. Los valores de los diferentes parámetros mostrados en tablas y gráficas corresponden a los valores medios de las réplicas realizadas con las correspondientes desviaciones estándar ($\pm$ sd). Para la realización de estos análisis se empleó el programa Statistical Package for Social Sciences (SPSS Inc, versión de software 26.0, Chicago, IL, EE. UU.).

CAPÍTULO VI

RESULTADOS Y DISCUSIÓN



4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE CARNE POR CONTACTO CON UNA SUPERFICIE CALIENTE

4.1.1 Percepción de los grados de cocción por los consumidores

El grado de cocción se puede caracterizar por la temperatura alcanzada en el centro del producto, por el color central o por la consistencia del producto (King y Whyte, 2006; NCBA, 1998). La American Meat Science Association, (AMSA, 1995), establece las siguientes temperaturas para los diferentes grados de cocción de la carne: 55 °C-muy poco hecho, 60 °C-poco hecho, 63 °C- medio hecho, 71 °C-hecho, 77 °C-bien hecho y 82 °C-muy bien hecho. Desde el punto de vista de la aceptación del consumidor, es muy difícil establecer una relación entre la temperatura interna de cocción y la percepción del grado de cocción ya que ésta depende de las preferencias del consumidor. Además, las preferencias del consumidor no coinciden habitualmente con las temperaturas consideradas seguras desde el punto de vista microbiológico (López Osornio et al., 2008). El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, USDA, atendiendo a criterios de seguridad alimentaria, recomienda una temperatura de 62,8 °C para los filetes de ternera y un tiempo de reposo de tres minutos antes de comer.

Por otra parte, en un ambiente doméstico, el color de la carne todavía se usa para definir el grado de cocción. Los termómetros suelen emplearse cuando la carne se hornea, pero no cuando se cocina por contacto con una superficie caliente (Elshahat et al., 2019; McCurdy et al., 2005). Además, en este tipo de cocción no es fácil medir con precisión la temperatura en el centro de la carne, ya que una desviación de ± 1 mm en la posición del sensor de temperatura puede causar cambios de temperatura de 3 -5 °C (Kondjoyan et al., 2013).

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se consideró útil conocer la percepción que los consumidores de carne cocinada a la plancha tienen sobre los distintos puntos o grados de cocción. Para ello se realizó una encuesta que consistía en un análisis sensorial visual de imágenes del interior de trozos de lomo de ternera (de $1,9 \pm 0,2$ cm de grosor y de $43,7 \pm 6,7$ g de peso), cocinados con diferentes grados de cocción que se cortaron longitudinalmente. Los tiempos de cocción fueron: 180 s para el Grado 1, 300 s para el Grado 2, 360 s para el Grado 3, 420 s para el Grado 4 y 720 s para el Grado 5. Con estos

tiempos de cocinado la temperatura final en el centro del producto fue de 30 °C para el Grado 1, 44,1 °C para el Grado 2, 54,7 °C para el Grado 3, 57,9 °C para el Grado 4 y de 63,6 °C para el Grado 5. La encuesta se realizó utilizando la aplicación de Google Formularios, se distribuyó mediante una dirección url (https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSf_2PZvWTg2hxnpxFmBssxH22imeWi-xV5BVF6IP2Bk3GNPDA/viewform) y se creó un código QR para facilitar el acceso a la misma.

En el formulario en primer lugar se preguntaba sobre la frecuencia con la que el encuestado suele cocinar. La encuesta fue realizada por 511 personas de las cuales el 47,8 % cocinaban muy frecuentemente. Posteriormente se visualizaban 5 imágenes de carne cocinada y se pedía al encuestado que les asignara una puntuación del 1 (poco hecho) al 10 (muy hecha) según su opinión sobre el punto de cocción que apreciaba. En la Figura IV- 1 se muestra, a modo de ejemplo, una de las imágenes y la escala a la que correspondería cada grado de cocción según la respuesta del encuestado. Por lo tanto, una puntuación de 1 ó 2 corresponde con el Grado 1, 3 ó 4 con el Grado 2, 5 ó 6 con el Grado 3, 7 u 8 con el Grado 4 y 9 ó 10 con el Grado 5.

¿Qué punto de cocción tiene esta carne?



1		2		3		4		5		6		7		8		9		10							
Poco hecha																								Muy hecha	
		Grado1				Grado 2				Grado 3				Grado 4				Grado 5							

Figura IV- 1. Ejemplo de imagen mostrada en el formulario de evaluación sensorial y escala de correspondencia entre puntuación y grados de cocinado.

En la Figura IV- 2 se muestra la distribución de la puntuación para cada una de las muestras. Se comprobó que los consumidores no asignaban a la carne la puntuación que correspondía con su grado de cocción, salvo en el Grado de cocción 5 al que un 72,9 % de los encuestados puntuó con un 9 ó 10. Además, los resultados indican solapamientos entre los Grados de cocción 1 y 2, y entre los Grados 3 y 4. Sólo el 33,3 % de los encuestados asignó la puntuación que le correspondía (1 ó 2) al Grado 1, mientras que un 45,2 % de los encuestados puntuó con 1 ó 2 al Grado 2; es decir, que el Grado 2

fue considerado como menos hecho que el Grado 1. Algo similar ocurre con los Grados 3 y 4. La mayoría de los encuestados (un 64,7 %) le asignó al Grado 3 puntuaciones de 3,4 ó 5, mientras que un porcentaje similar de encuestados (60 %) asignó las mismas puntuaciones al Grado 4. En estos resultados no hubo diferencias entre las respuestas de las personas que cocinaban habitualmente y las que no lo hacían.

Por lo tanto, este análisis reveló que los consumidores diferenciaban claramente sólo tres grados de cocción. A pesar de este resultado, se consideró interesante mantener cinco grados de cocción durante este estudio puesto que pueden existir otros criterios de caracterización de los grados de cocción mediante análisis sensorial o instrumental en los que sí que haya claras diferencias entre los distintos grados de cocción. Además, los resultados de esta encuesta son orientativos porque, a pesar del elevado número de respuestas, no existen evidencias de que procedan de un grupo representativo de la sociedad.

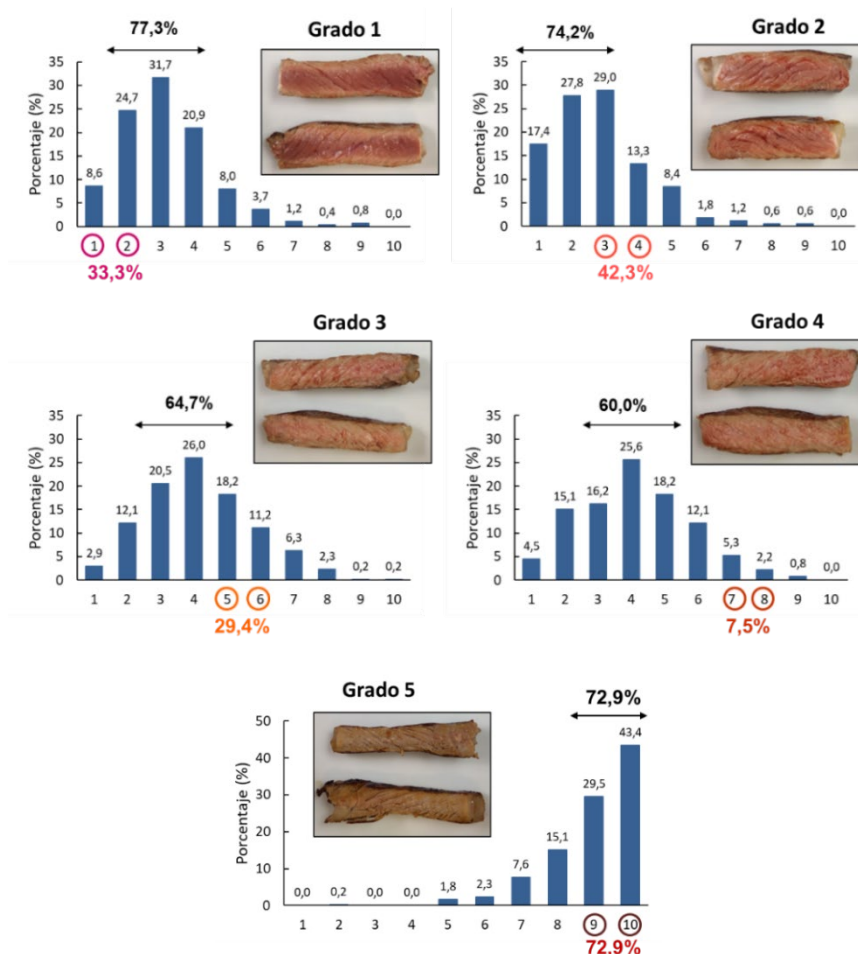


Figura IV- 2. Distribución de las puntuaciones asignadas a las imágenes de carne con diferentes grados de cocción.

Existe controversia (King y Whyte, 2006) sobre la idoneidad de relacionar el color de la carne con el grado de cocción puesto que la relación entre el tiempo de cocción, la temperatura y el color de la carne depende de muchos factores, como el pH (Hughes et al., 2017; Trout, 1989), el origen de la carne (Suman et al., 2014), la capacidad de retención de agua (Hughes et al., 2014), las condiciones de envasado (Stella et al., 2018) o el método de cocción (Yancey et al., 2011). Sin embargo, el color de la carne es un criterio que se utiliza habitualmente para evaluar el grado de cocción y para la asistencia al cocinado sería muy interesante conocer la evolución del color en el interior de la carne. Esta información, como complemento a los datos de temperatura, permitiría una mejor aproximación al grado de cocción deseado por el consumidor.

4.1.2 Cinética del cambio de color de la carne

Los cambios de color en la carne causados por el calentamiento pueden cuantificarse mediante una cinética similar a la de una reacción química; de la misma manera que se hace para otros atributos de calidad (Datta, 2016; Ling et al., 2015) o propiedades de la carne como el contenido de agua (Kondjoyan et al., 2013). Sin embargo, tras la revisión bibliográfica inicial se constató que la cinética de cambio de color por calentamiento de la carne de ternera no está suficientemente descrita. Existen algunos estudios como el de Goñi y Salvadori (2011) en el que se describe la variación de la coordenada CIELab a^* , pero que no analiza los cambios de luminosidad; o el de Kondjoyan et al. (2014) que no incluye los cambios de color a temperaturas inferiores a 65 °C. Por lo tanto, ante esta laguna de información, se consideró útil determinar la cinética del cambio de color de la carne de ternera a partir de la medida de las coordenadas CIELab de imágenes obtenidas mediante escáner utilizando trozos de carne sometidos a tratamientos térmicos a temperaturas controladas entre 30 y 90 °C durante diferentes tiempos (apartado 3.2.5 de materiales y metodología experimental).

El color de la carne cambia durante el calentamiento de tonos rojos a marrones claros pasando por rosas grisáceos, y estas variaciones se reflejan en las coordenadas CIELab. La Figura IV- 3 y la Figura IV- 4 muestran la evolución de las coordenadas L^* y a^* con el tiempo a diferentes temperaturas. Estos parámetros de color se han expresado normalizados con respecto al valor inicial medido en la carne cruda ($L_0^* = 45,23 \pm 0,99$ y $a_0^* = 13,55 \pm 0,63$). La luminosidad, coordenada L^* , a temperaturas inferiores a 60 °C,

aumenta con el tiempo hasta estabilizarse, mientras que a temperaturas más altas la luminosidad se incrementa rápidamente hasta un máximo y posteriormente decrece hasta estabilizarse en un valor inferior a este máximo. Por otra parte, en la coordenada a^* , no se observaron cambios de relevancia para temperaturas inferiores a 45 °C. A temperaturas más altas, los valores de a^* siguen una tendencia similar a la coordenada L^* , ya que tras un ligero aumento de los instantes iniciales, se observa un descenso hacia un valor de equilibrio (siempre inferior al valor inicial) debido a la pérdida del tono rojo característico de la carne cruda. La coordenada b^* (resultados no mostrados) tan apenas se modificaba durante el tratamiento térmico (b^*/b_0^* comprendido entre 1,1 y 0,9) y además, estos pequeños cambios no seguían una tendencia clara.

El tono rojo de la carne está asociado con las hemoproteínas y la pérdida durante el calentamiento de esa tonalidad roja característica que tiene la carne cruda está relacionada con la desnaturalización de la mioglobina y la hemoglobina que se produce a los 65 °C - 80 °C (Martens et al., 1982). Sin embargo, el cambio de color de la carne durante su calentamiento no puede explicarse exclusivamente por esto. La mayor contribución al cambio de color absoluto es debida a la variación de la luminosidad y por lo tanto no está únicamente asociada a las modificaciones de la tonalidad roja (Pakula y Stamminger, 2012), como se puede ver en los datos de la Figura IV- 3 y de la Figura IV- 4, especialmente a temperaturas por debajo de 60 °C. El aumento de luminosidad se puede explicar por las modificaciones estructurales que sufre la carne durante el calentamiento que producen cambios en la dispersión de la luz. Los espacios generados entre las fibras debido a la contracción del músculo y las miofibrillas causados por la desnaturalización de las proteínas, la reducción de la capacidad de retención de agua y la disrupción del sarcolema, son algunos cambios estructurales clave que pueden aumentar la luz reflejada (Hughes et al., 2014). Los cambios de luminosidad que se producen durante el calentamiento son similares a los resultados encontrados por Kondjoyan et al. (2014) para carne de vacuno a 66, 98 y 205 °C. Sin embargo, la evolución de la tonalidad roja difiere de la obtenida por Goñi y Salvadori (2011) ya que en este estudio la coordenada a^* disminuye con el tiempo para todas las temperaturas hasta alcanzar una meseta para tiempos de cocción prolongados. Esta variación de la coordenada a^* podría describirse con una cinética de primer orden con valor límite a tiempo infinito. Sin embargo, en el

trabajo citado no se dispone de datos para tiempos inferiores a 2,5 min, siendo en esos tiempos cuando se produce el aumento de la coordenada a^* .

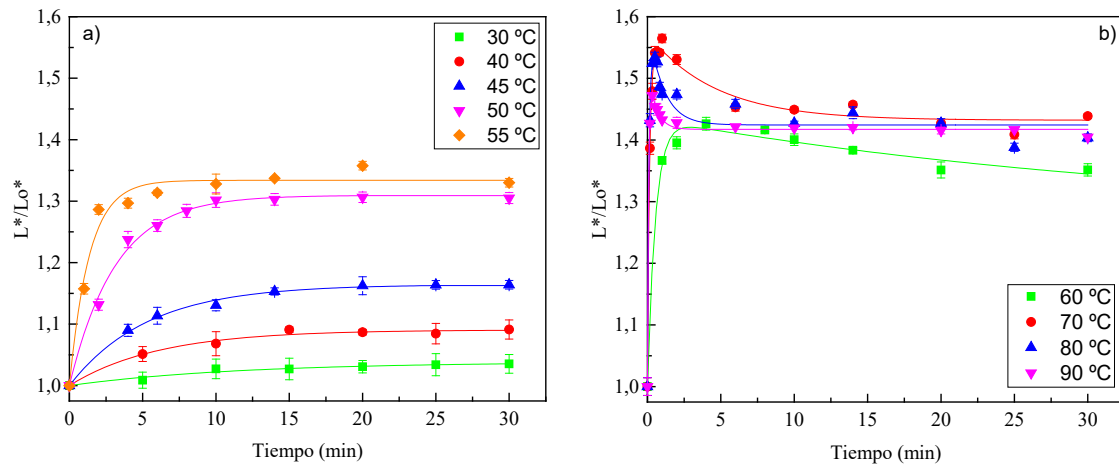


Figura IV- 3. Evolución de la luminosidad, L^* , respecto a la de la carne cruda durante tratamientos térmicos a diferentes temperaturas: a) de 30 a 55 °C y b) de 60 a 90 °C. Los puntos corresponden a valores experimentales y las líneas al ajuste del modelo cinético.

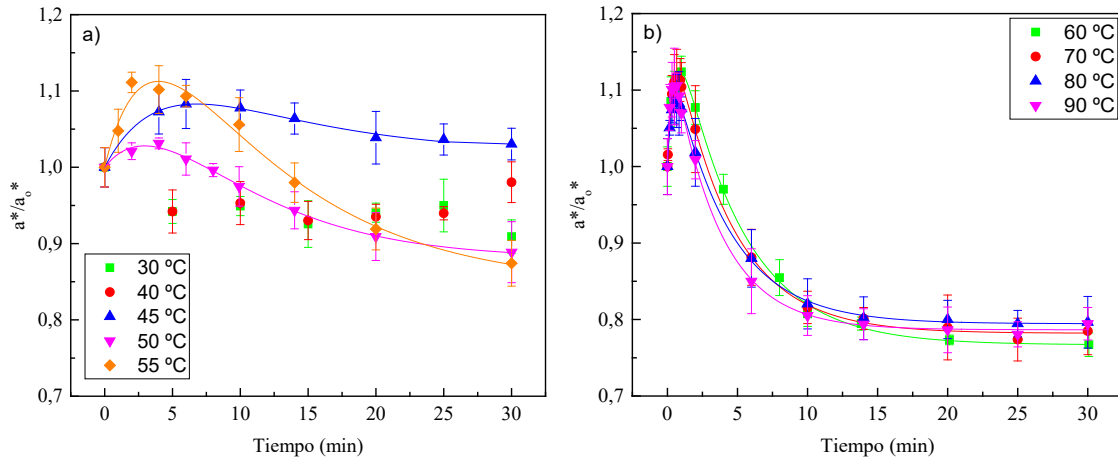


Figura IV- 4. Evolución de la coordenada CIELab a^* respecto a la de la carne cruda durante tratamientos térmicos a diferentes temperaturas: a) de 30 a 55 °C y b) de 60 a 90 °C. Los puntos corresponden a valores experimentales y las líneas al ajuste del modelo cinético.

Los cambios en los atributos de los alimentos debidos a tratamientos térmicos se pueden expresar de forma genérica mediante un modelo cinético (Rabeler y Feyissa, 2018a), con las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dQ}{dt} = -k(Q - Q_{\infty})^n, \quad Q_0 \geq Q \geq Q_{\infty} \quad \text{ec. (4.1)}$$

$$\frac{dQ}{dt} = -k(Q_{\infty} - Q)^n, \quad Q_0 \leq Q \leq Q_{\infty} \quad \text{ec. (4.2)}$$

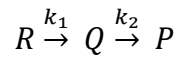
donde Q es el parámetro medido, t es el tiempo, n es el orden de reacción (principalmente $n = 0, 1$ o 2), Q_{∞} es el valor del parámetro a tiempo infinito y k es la

constante de la velocidad de reacción, cuya dependencia con la temperatura generalmente se puede expresar mediante la ecuación de Arrhenius (ec.(4.3)):

$$k = k_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad \text{ec. (4.3)}$$

donde T (K) es la temperatura absoluta, k_0 es el factor pre-exponencial, E_a es la energía de activación y R es la constante universal de los gases ideales (8,31 J/mol K).

Sin embargo, la evolución en el tiempo de las coordenadas de color L^* y a^* durante el tratamiento térmico de la carne no puede describirse con una sola reacción puesto que estos parámetros alcanzan un máximo (Figura IV- 3 y Figura IV- 4). Se consideró que los cambios de las coordenadas L^* y a^* durante la cocción de la carne de vacuno correspondían a un atributo intermedio, Q , involucrado en dos reacciones en serie de acuerdo con el siguiente esquema:



$t = 0$	R_0	Q_0	P_0
$t = \infty$	R_∞	Q_∞	P_∞

donde R_0 , Q_0 y P_0 son los valores iniciales de los parámetros R , Q y P , y R_∞ , Q_∞ y P_∞ son los valores finales en el equilibrio distintos de cero después de largos tiempos de calentamiento.

Por lo tanto, la evolución de las coordenadas L^* y a^* con el tiempo y la temperatura se han descrito mediante un modelo cinético basado en dos reacciones sucesivas de primer orden de conversión fraccionaria, ec 4.4 y ec 4.5:

$$\frac{L^*}{L_0^*} = 1 + \left(\frac{L_\infty^*}{L_0^*} - 1\right)(1 - e^{-k_2 t}) + \frac{k_1(R_0 - R_\infty)}{L_0^*(k_2 - k_1)}(e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) \quad \text{ec. (4.4)}$$

$$\frac{a^*}{a_0^*} = 1 + \left(\frac{a_\infty^*}{a_0^*} - 1\right)(1 - e^{-k_2 t}) + \frac{k_1(R_0 - R_\infty)}{a_0^*(k_2 - k_1)}(e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) \quad \text{ec. (4.5)}$$

donde L_∞^* y a_∞^* son los valores de las coordenadas a tiempo infinito, k_1 y k_2 (min⁻¹) son las constantes de velocidad, t (min) es el tiempo, y $R_0 - R_\infty$ es el reactivo consumido en la primera reacción.

Los parámetros cinéticos se obtuvieron utilizando el método de ajuste por mínimos cuadrados entre los valores calculados y los experimentales utilizando el

algoritmo de Levenberg-Marquardt. En las Tabla IV- 1 y Tabla IV- 2 se muestran los parámetros cinéticos estimados para las coordenadas CIELab L^* y a^* , respectivamente. Las constantes de la velocidad de degradación del color aumentan con la temperatura, pero esta dependencia no se pudo describir adecuadamente mediante la ecuación de Arrhenius. En todos los casos, el coeficiente de determinación (R^2) fue superior a 0,9469, lo que indica que el modelo cinético propuesto es adecuado para describir la degradación térmica del color de la carne. Para poder visualizar la idoneidad del modelo, en las Figura IV- 3 y Figura IV- 4 se muestran representadas con líneas el ajuste de los valores experimentales al modelo cinético propuesto.

Tabla IV- 1. Parámetros cinéticos de degradación térmica de la coordenada L^* en carne de lomo de ternera.

Temperatura (°C)	$n = \frac{L_{\infty}^*}{L_0^*}$	$m = \frac{R_0 - R_{\infty}}{L_0^*}$	$k_1 (min^{-1})$	$k_2 (min^{-1})$	R^2
30	1	0,0383± 0,0044	0,0014± 0,0004	0	0,9469
40	1	0,0906± 0,0032	0,0027± 0,0004	0	0,9799
45	1	0,1642± 0,0033	0,0031± 0,0002	0	0,9944
50	1	0,3095± 0,0057	0,0053± 0,0004	0	0,9934
55	1	0,3339± 0,0098	0,0123± 0,0017	0	0,9731
60	1,2684± 0,2263	0,4287± 0,0112	0,0305± 0,0051	0,0004± 0,0009	0,9887
70	1,4320± 0,0062	0,5541± 0,0086	0,1100± 0,0128	0,0036± 0,0011	0,9656
80	1,4244± 0,0068	0,5342± 0,0179	0,1527± 0,0417	0,0163± 0,0082	0,9687
90	1,4172± 0,0022	0,4462± 0,0063	0,2009± 0,0212	0,0163± 0,0080	0,9977

Tabla IV- 2. Parámetros cinéticos de degradación térmica de la coordenada a^* en carne de lomo de ternera.

Temperatura (°C)	$n = \frac{a_{\infty}^*}{a_0^*}$	$m = \frac{R_0 - R_{\infty}}{a_0^*}$	$k_1 (min^{-1})$	$k_2 (min^{-1})$	R^2
45	1,0208± 0,0270	0,1885± 0,0740	0,0027± 0,0031	0,0027± 0,0006	0,98644
50	0,8810± 0,0093	0,2467± 0,0286	0,0029± 0,0003	0,0029± 0,0093	0,9949
55	0,8436± 0,0411	1,1803± 0,1220	0,0017± 0,0010	0,0050± 0,0026	0,9759
60	0,7669± 0,0058	3,8473± 0,6705	0,0037± 0,0003	0,0328± 0,0043	0,9970
70	0,7820± 0,0024	4,3628± 0,4253	0,0041± 0,0002	0,0451± 0,0035	0,9992
80	0,7945± 0,0014	3,9168± 0,2684	0,0042± 0,0001	0,0484± 0,0026	0,9996
90	0,7866± 0,0025	5,4333± 0,6253	0,0050± 0,0002	0,0735± 0,0066	0,9989

4.1.3 Caracterización de los grados de cocinado

Este estudio se realizó con trozos de carne de lomo de ternera de diferentes grosores ($1,9 \pm 0,2$ cm; $2,6 \pm 0,1$ cm y $3,4 \pm 0,2$ cm) y con filetes enteros de $1,9 \pm 0,2$ cm

de grosor. De esta manera se pretendía extender las conclusiones que pudieran obtener a distintas condiciones iniciales de la carne. Para conocer el tiempo de cocinado necesario para alcanzar el mismo grado de cocción en todos los grosores, se realizaron unos ensayos previos con cocciones muy prolongadas en los que se registraba la temperatura en el centro de la carne. A partir de estos datos se fijaron los tiempos de cocción que se muestran en la Tabla IV- 3 donde se indica la temperatura final alcanzada para cada grado de cocción y el tiempo de cocción empleado. Se daba vuelta a la carne transcurridos 2/3 del tiempo final de cocción.

Tabla IV- 3. Temperatura final en el centro del producto y tiempo de cocción de los cinco grados de cocinado para los diferentes tamaños y grosores de carne estudiados.

Grado cocción	Temperatura final (°C)	Tiempo de cocción (s)			
		Filete 1,9 cm	Trozo 1,9 cm	Trozo 2,6 cm	Trozo 3,4 cm
Grado 1	30,0	180	180	225	263
Grado 2	44,1	300	300	450	493
Grado 3	54,7	360	360	632	660
Grado 4	57,9	420	420	720	770
Grado 5	63,6	720	720	900	1247

Lógicamente, cuanto mayor era el grosor del lomo de ternera fue necesario establecer tiempos más largos de cocción para alcanzar la misma temperatura final en el centro del producto. Sin embargo, como se puede observar en la Tabla IV- 3, para el filete y el trozo de 1,9 cm, se necesitaba el mismo tiempo de cocción para obtener el mismo grado de cocción. Esto indica que el tamaño del trozo de carne a cocinar tan apenas influye a la hora de elegir los tiempos de cocinado, pero sí lo hace el grosor.

Lógicamente, había que corroborar si con los tiempos de cocción así seleccionados se obtenía, para cada grado de cocción, una temperatura final similar para todos los grosores y tamaños de la carne. Para ello durante la cocción de la carne se registró la temperatura central y su evolución se muestra en la Figura IV- 5. Como puede observarse para un mismo grado de cocción la evolución de la temperatura es diferente debido a que el lomo de ternera con mayor grosor va aumentando la temperatura central más despacio, aunque al final del cocinado las temperaturas finales sean similares.

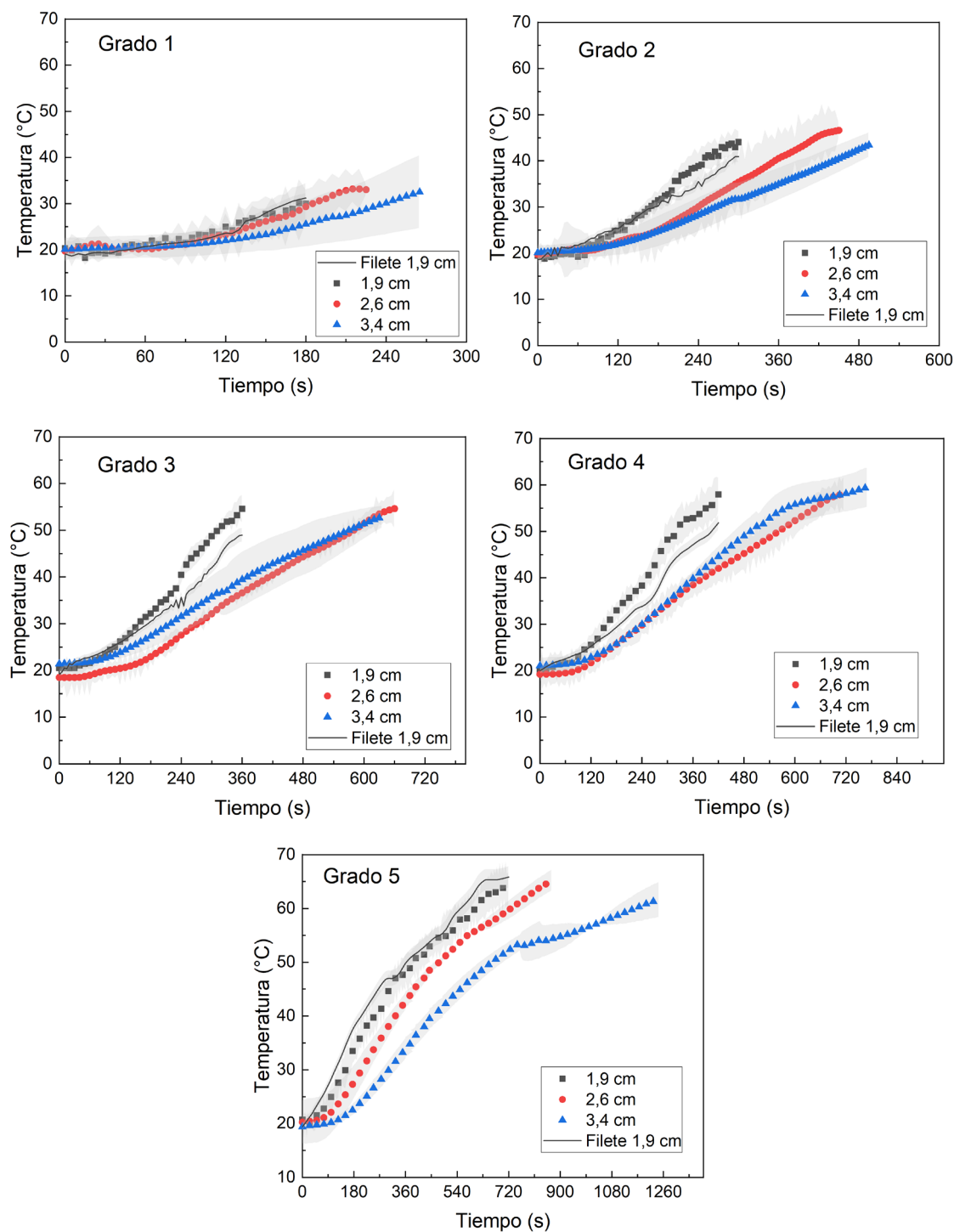


Figura IV- 5. Evolución de la temperatura en el centro de la carne para diferentes grosores, tamaños y grados de cocción.

A partir de estos datos se obtuvieron las temperaturas máximas reales alcanzadas para cada uno de los grados de cocción estudiados (Tabla IV- 4). Como se puede observar las temperaturas finales difieren de unos espesores a otros como máximo en 3 °C, por lo que se consideraron adecuados los tiempos de cocción establecidos. En este tipo de

cocción no es fácil medir con precisión la temperatura en el centro del producto debido a las características blanda y deformable de la carne. En el estudio de Kondjoyan et al. (2013) se atribuye la imprecisión en la posición de la sonda de temperatura a la retracción que sufre la carne durante su cocinado que hace que se modifique la ubicación la sonda. También argumenta que la migración de fluidos de la carne puede tener efecto sobre la temperatura central. Las temperaturas que se registran cercanas a la superficie de la carne son más sensibles al movimiento del termopar y a la expulsión repentina de jugo, lo que explica las oscilaciones de temperatura registradas. Cuanto menor sea el grosor de la carne es más probable que existan oscilaciones de la temperatura central.

Tabla IV- 4. Temperaturas máximas reales alcanzadas en los trozos de carne de diferentes espesores y tamaños para los distintos grados de cocción.

Grado cocción	Filete (e=1,9cm)		Trozo e=1,9cm		Trozo e=2,6cm		Trozo e=3,4cm	
	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
Grado 1	180	31,2±0,9a	180	30,0±4,3a	225	33,0±1,2a	263	32,5±7,9a
Grado 2	300	40,9±1,2a	300	44,1±2,3ab	450	46,6±1,7b	493	43,4±2,6ab
Grado 3	360	48,9±1,5a	360	54,6±2,9b	660	54,6±4,0b	632	52,9±2,3ab
Grado 4	420	52,0±1,6a	420	58,0±3,6ab	720	58,0±3,6ab	770	59,5±4,2b
Grado 5	720	65,8±2,0a	720	63,6±3,2a	900	65,3±1,9a	1247	61,6±3,3a

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p<0,05$) entre grosores y tamaños para un mismo grado de cocción.

Estas imprecisiones en la medición de la temperatura provocan desviaciones en la temperatura final alcanzada en el centro del producto, por lo que, a efectos prácticos de cocinado doméstico y de cocinado asistido, sería útil contar con otro parámetro que nos proporcionara una caracterización complementaria del grado de cocción deseado por el consumidor. Por ello, se estudiaron como alternativas el color y la pérdida de peso como indicadores del grado de cocción.

4.1.3.1 El color como indicador del grado de cocción

En la Figura IV- 6 se muestran cómo cambian las coordenadas L^* y a^* , en un ROI de 3 x 3 mm, en la zona central de la carne con los grados de cocción para los diferentes tamaños y espesores. La tendencia que siguieron las coordenadas de color al incrementar la intensidad de la cocción fue similar en todos los casos y no se vio influida por las dimensiones que tuviese la carne. Con respecto a la coordenada a^* , aumenta muy ligeramente al cocinar la carne con respecto a la carne cruda, pero sin que se apreciaran diferencias significativas entre grados de cocción, salvo para el Grado 5, en la que se

observa un importante descenso como consecuencia de la desaparición de la característica tonalidad rosácea en el centro de la carne. El estudio de Goñi y Salvadori (2011) señala que el cambio de color que se produce durante el cocinado de la carne de ternera, donde se parte de un color rojo rosado y se pasa a un color marrón grisáceo, viene determinado por la coordenada a^* y estos cambios son los que en realidad perciben los consumidores y pueden determinar la aceptabilidad y el punto de cocción del producto. Sin embargo, la coordenada L^* (luminosidad) tiene que tenerse en cuenta debido a que tiene una gran contribución en color de la carne, donde se produce un gran cambio de la luminosidad durante el cocinado. La coordenada L^* aumentó hasta el grado de cocción Grado 3, momento a partir del cual se estabilizó. Este aumento del valor de L^* y su posterior estabilización coincide con los datos obtenidos en el estudio cinético (Figura IV- 3) y con los resultados del estudio realizado por Garcia-Segovia et al. (2007). Por otra parte, Pakula y Stamminger (2012) indican que el cambio de luminosidad de la carne se debe al aumento de la reflexión de la luz desde la superficie de la carne ya que esta se vuelve más opaca a temperaturas superiores a 40 °C. La desnaturalización de la miosina se ha apuntado como la causa que provoca los cambios visibles en la opacidad de la carne (Martens et al., 1982; Tornberg, 2005). Como podemos ver en la Tabla IV- 4, a partir del Grado 2, la temperatura final en el centro del lomo de ternera ha superado los 40 °C.

Por otra parte, para un mismo grado de cocción las coordenadas L^* y a^* varían con el espesor y tamaño de la muestra en una cuantía en algunos casos similar a lo que cambian entre grados de cocción, por lo que no se pudo establecer unos valores con los que se puedan caracterizar los grados de cocinado. Esto es debido a que en el color no solamente influye la temperatura final alcanzada (que es similar para todas las muestras) sino su evolución con el tiempo, y eso sí que es muy diferente. Para corroborar este aspecto, en la Figura IV- 7 se muestran imágenes de la sección central de trozos de carne de diferentes espesores tras su cocinado para los cinco grados de cocción estudiados. Visualmente para un mismo grado de cocción las muestras más gruesas se aprecian como menos hechas que las más finas, aunque la temperatura final en ambas haya sido la misma.

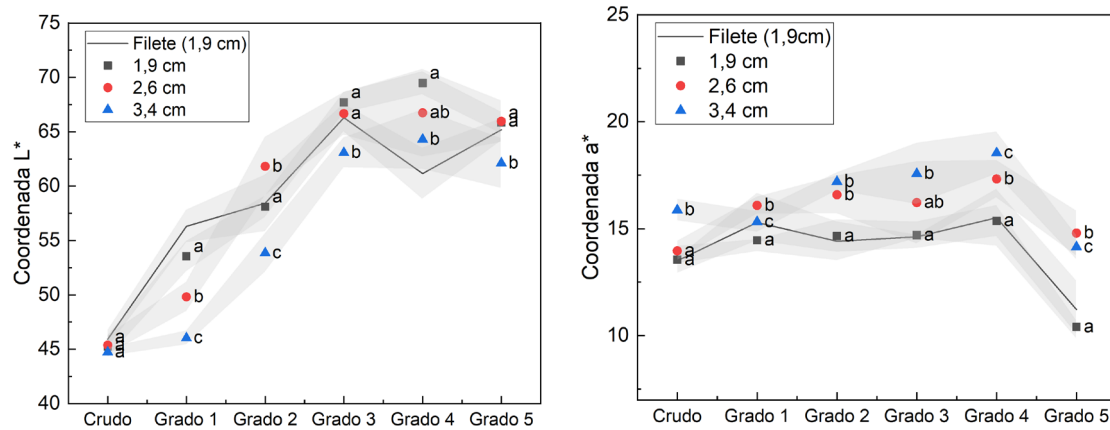


Figura IV- 6. Coordenada L* (izda) y a* (dcha) en los trozos de carne de diferentes espesores y en el filete entero para los cinco grados de cocción. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tamaños y grosores para un mismo grado de cocción.

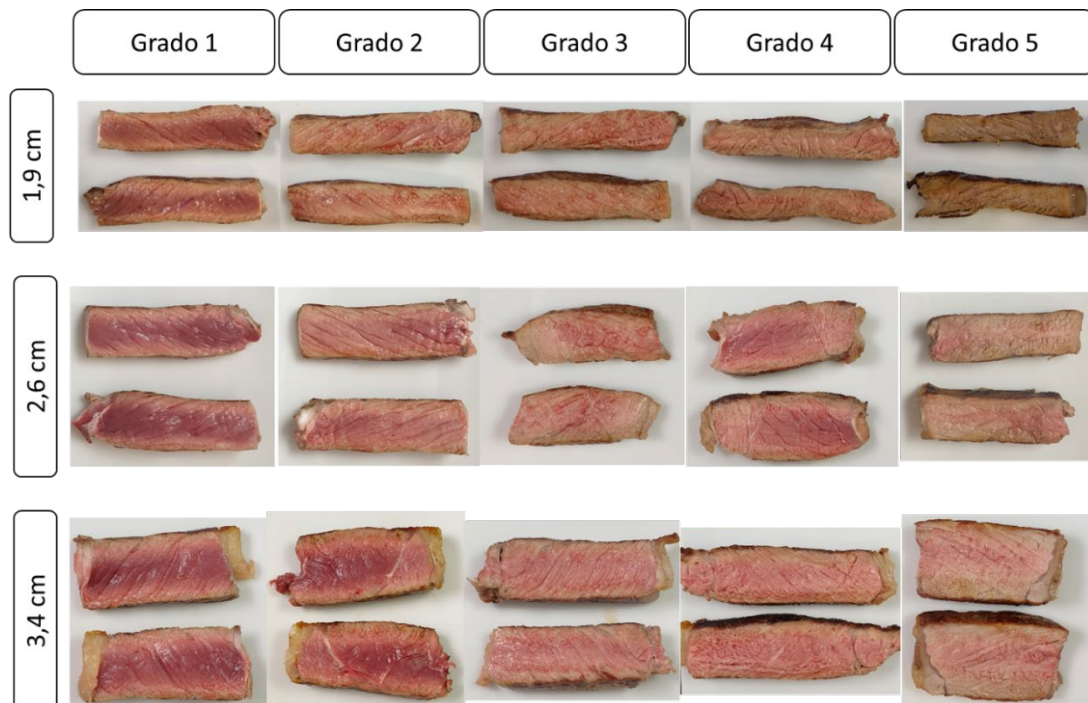


Figura IV- 7. Apariencia visual de los trozos de lomo de ternera de diferente grosor para los cinco grados de cocción.

Como hemos visto, el color en el centro de la carne no se puede utilizar como único parámetro para establecer unos valores con los que se pueda caracterizar el grado de cocinado. Por ello, se determinaron las coordenadas de color a lo largo del espesor de la carne con el fin de conocer cómo cambia el perfil transversal del color con los grados de cocinado.

En la Figura IV- 8 se muestran las coordenadas L* y a* a diferentes distancias de la superficie de la carne, obtenidas para los 5 grados de cocción al final del cocinado, en

el caso de trozos de lomo de ternera de 1,9 cm de grosor. Para grados de cocción ligeros, se puede distinguir visualmente la presencia de dos zonas: una central en la que la luminosidad y la tonalidad roja de la carne son mayores que la de la carne cruda (L^* alrededor de 55 y a^* entre 14 y 15), y otra zona estrecha próxima a la superficie en la que la carne ha perdido su característica tonalidad roja con valores de a^* menores de 13,5. Para grados de cocción más intensos, el espesor del área donde la carne ha perdido la tonalidad roja característica aumenta, adquiriendo tonalidades grises marronáceas con un descenso de la coordenada a^* hasta valores en torno a 8, mientras que la luminosidad en la zona central alcanza valores más altos (entre 65 y 70). En la Figura IV- 8 también se puede apreciar que el perfil de color no es simétrico. Esto indica que el tratamiento térmico no ha sido equivalente por ambas caras. La separación entre las zonas comentadas anteriormente no se sitúa en la misma posición en ambas caras. Esto indica que el tiempo al que se ha dado la vuelta a la carne no es adecuado para conseguir una distribución de color homogénea en ambas caras. Este punto se abordará con mayor profundidad posteriormente cuando se trate la asistencia al cocinado a partir del modelado matemático del proceso de cocinado (apartado 4.1.6). Esta descripción de cómo varían las coordenadas L^* y a^* en el interior de la carne al final de la cocción se puede corroborar visualmente en las fotografías de la Figura IV- 9.

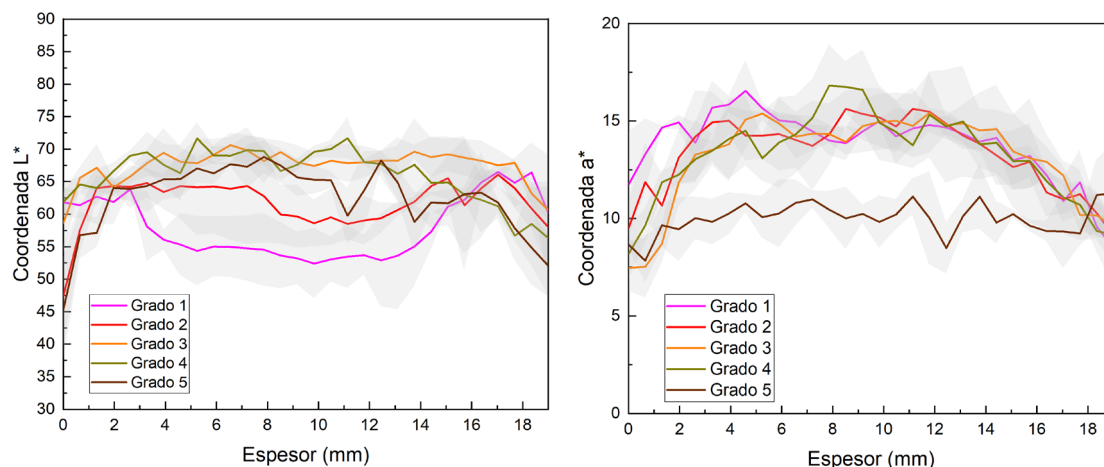


Figura IV- 8. Evolución de las coordenadas L^* (izqda) y a^* (dcha) con el espesor, en trozos de carne de 1,9 cm de grosor para los 5 grados de cocción.

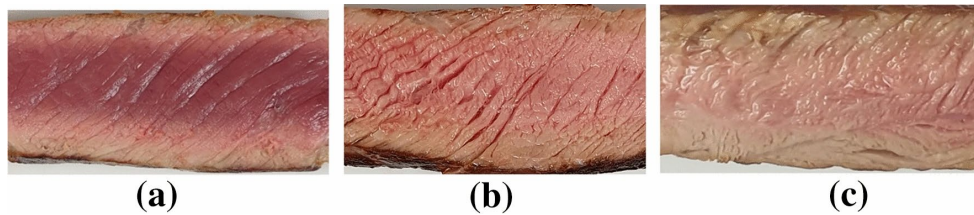


Figura IV- 9. Fotografías de trozos de carne de ternera de 1,9 cm de grosor al final del proceso de cocción cortados por su eje longitudinal para distintos grados de cocción: a) Grado 1, b) Grado 2 y c) Grado 4.

4.1.3.2 La pérdida de peso como indicador del grado de cocción

La pérdida de peso durante la cocción es un parámetro que se podría correlacionar con el grado de cocción de la carne y ser útil para establecer estrategias para la asistencia al cocinado, sobre todo para indicar el momento de dar la vuelta o de finalizar la cocción para que conseguir el grado de cocción deseado. La pérdida de peso durante la cocción de la carne está asociada fundamentalmente a la pérdida de agua. Cuando la carne se calienta, el agua migra hacia la superficie en forma líquida o en forma vapor. La temperatura y el contenido en agua en el interior de la carne cambia con el tiempo, modificándose el volumen de la carne. La desnaturalización de las proteínas origina cambios estructurales como la retracción de las fibras musculares y del tejido conectivo y la formación de poros mayores en las partes de la carne próximas a la superficie que en la zona central (Feyissa et al., 2013). Estos cambios en la porosidad conducen a un incremento de la permeabilidad en las zonas externas de la carne y en consecuencia a un aumento en el transporte de agua. La fuerza mecánica ejercida en el fluido intersticial por la contracción de las proteínas conduce a la expulsión del agua, siendo este mecanismo nada despreciable frente a la evaporación, pudiendo llegar a suponer el 80 % del agua perdida (Tornberg, 2013). La desnaturalización y contracción de las proteínas ocurre desde los 45 °C hasta los 75 °C - 80 °C, mientras que por encima de los 80 °C la pérdida por cocción disminuye gradualmente (Tornberg, 2005).

En la Figura IV- 10 se muestra la evolución de la pérdida de peso durante la cocción de muestras de carne de diferentes grosores y tamaños para los distintos grados de cocción. Como cabía esperar, se produjo un aumento de la pérdida de peso al incrementarse la intensidad de la cocción. Para grados de cocción prolongados, la temperatura central es mayor y se confirma la tendencia observada por otros autores de que la pérdida de agua de la carne aumenta con la temperatura.

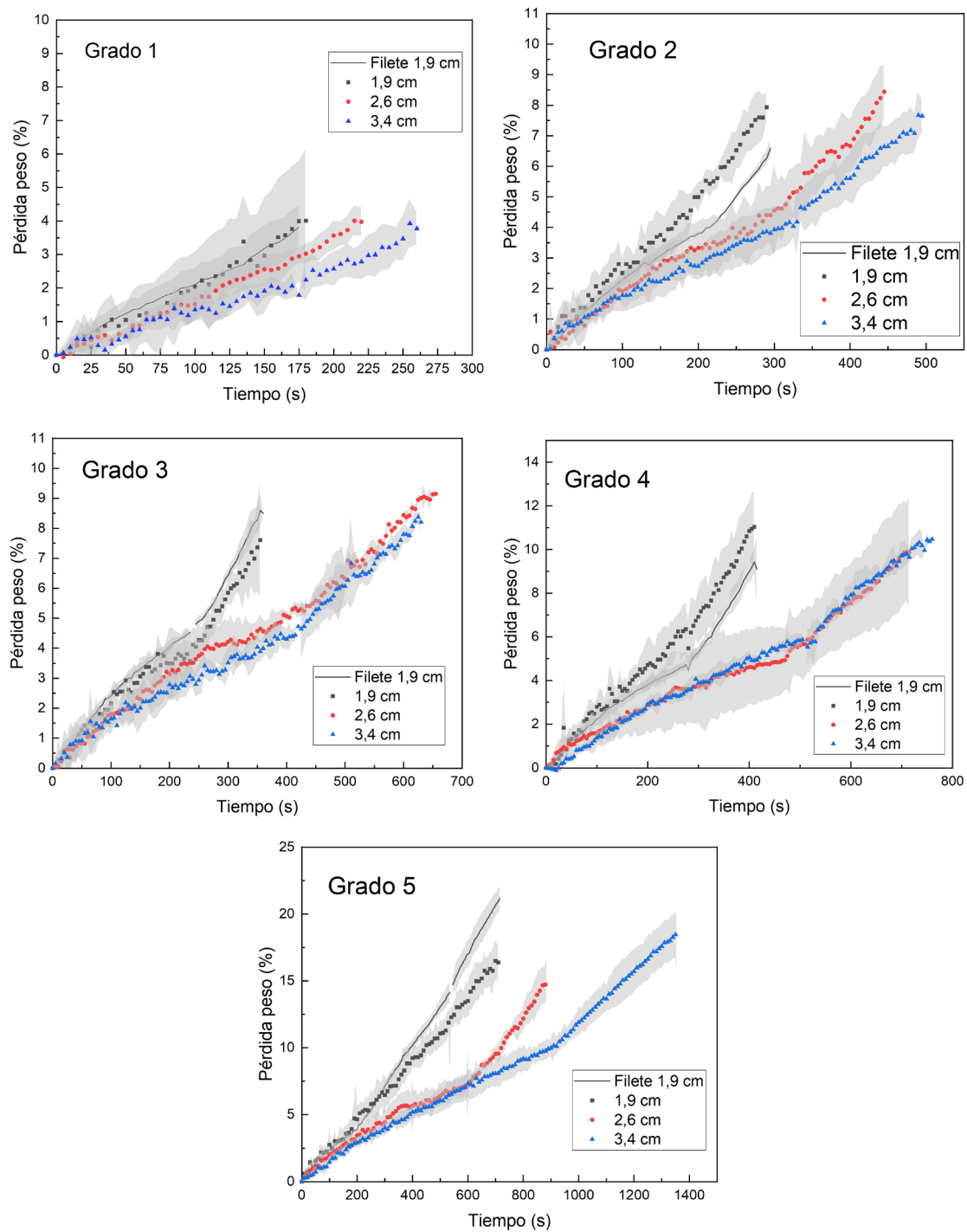


Figura IV- 10. Evolución de la pérdida de peso de la carne para diferentes grosores, tamaños y grados de cocción.

Por otra parte, para un mismo grado de cocción cuanto mayor es el grosor del lomo de ternera menores fueron las pérdidas de peso a un mismo tiempo, llegando a una pérdida de peso similar al final del proceso de cocción. Este resultado coincide con los de Kondjoyan et al. (2013), ya que obtuvieron diferencias de pérdida de peso de hasta el 15% entre muestras de diferentes dimensiones. Sin embargo, en nuestro caso, las

muestras de diferente tamaño, pero con el mismo grosor, tuvieron una pérdida de peso similar. Wang et al. (2022) estudiaron por separado el efecto del tiempo y la temperatura de cocción en las propiedades de la carne de yak mediante experimentos a temperatura controlada en baños termostáticos y concluyeron que la temperatura de cocción tiene más impacto en las pérdidas por cocción que el tiempo. Las imágenes de SEM muestran que a medida que la temperatura aumenta se produce la degradación del tejido conectivo intramuscular y que las fibras musculares se contraen lateral o longitudinalmente debido a la desnaturalización de las proteínas durante el proceso de cocción y se forman espacios entre las fibras musculares, debilitándose la capacidad de las fibras musculares de retener agua, proteínas solubles, grasa y otros compuestos solubles no proteínicos. Las fibras musculares se contraen lateralmente entre 40 y 60 °C. A temperaturas superiores, entre 60 °C y 70 °C, la estructura del tejido conectivo y las fibras musculares se contraen sinérgicamente, aumentando el grado de contracción longitudinal con la temperatura. Por ello, en grados de cocción intensos tenemos una mayor pérdida de peso ya que la temperatura central es más alta, y cuando tenemos diferente grosor obtenemos pérdidas de peso similares ya que la temperatura central es similar para un mismo grado de cocción. Pematilleke et al. (2021), a partir también de ensayos en baño termostático, afirman que las pérdidas por cocción aumentan con la temperatura y el tiempo de cocción, pero que a medida que la temperatura aumenta la influencia del tiempo de cocción se reduce. Este resultado es compartido por otros autores como Zielbauer et al. (2016), quienes concluyeron que a partir de una temperatura de aproximadamente 74 °C, la pérdida de peso durante el cocinado no se incrementa con el tiempo. Sin embargo, Erdogan et al. (2007) observaron un incremento en las pérdidas por cocción con el tiempo de cocinado, pero en este caso los tiempos de cocinado eran más cortos que los de los estudios anteriores (de minutos frente a horas) y por lo tanto un incremento del tiempo de cocinado llevaba consigo un aumento de temperatura.

Por otra parte, se observa que la pérdida de peso evoluciona linealmente con el tiempo de cocción, salvo en algún caso que coincide con el momento de dar la vuelta a la carne que se produce un cambio de pendiente en la pérdida de peso (Figura IV- 10). Esto se puede explicar porque antes del giro el agua líquida llega a la superficie superior de la carne a una velocidad mayor que la de evaporación, y en el momento del giro, esta agua se pone en contacto con la superficie de la sartén produciéndose una evaporación rápida

de la misma lo que se traduce en una mayor pérdida de peso que se refleja en el cambio de pendiente de las gráficas.

A partir de los resultados mostrados en la Figura IV- 10 se pudo establecer las pérdidas de peso en el momento de dar la vuelta (a 2/3 del tiempo final) y la pérdida de peso al final de la cocción. Como se puede observar en la Tabla IV- 5, los porcentajes de pérdida de peso para cada grado de cocción son similares en las diferentes muestras, por lo que cada grado de cocción estaría determinado por un porcentaje de pérdida de peso, independientemente del grosor y tamaño de la carne.

Tabla IV- 5. Pérdida de peso en el momento de giro y al final del cocinado en lomo de ternera de diferente grosor y tamaño para los cinco grados de cocinado.

Grado de cocción	Pérdida peso en el momento de dar la vuelta (%)			
	Filete 1,9cm	Trozo 1,9 cm	Trozo 2,6 cm	Trozo 3,4 cm
Grado 1	2,36±0,50a	2,40±1,37a	2,22±0,47a	2,06±0,36a
Grado 2	3,80±0,05a	4,12±0,57a	5,67±1,50b	4,04±0,38a
Grado 3	4,52±0,12a	4,99±0,48a	6,57±0,26b	4,44±0,24a
Grado 4	4,72±0,24a	5,47±1,27a	5,36±2,01a	5,87±0,27a
Grado 5	12,46±0,41a	10,68±0,71a	9,71±2,51a	10,15±1,08a
Grado de cocción	Pérdida peso al final del cocinado(%)			
	Filete 1,9cm	Trozo 1,9 cm	Trozo 2,6 cm	Trozo 3,4 cm
Grado 1	3,82±0,62a	4,00±2,13a	3,98±0,43a	3,77±0,50a
Grado 2	6,59±0,27a	7,60±1,87a	8,44±0,87a	7,65±0,55a
Grado 3	8,50±0,11a	7,93±0,49a	9,15±0,14b	8,21±0,37a
Grado 4	9,09±1,49a	11,03±1,64a	9,87±2,54a	10,47±0,02a
Grado 5	21,17±0,92b	16,38±1,79a	15,12±1,50a	17,84±2,03a

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre grosores y tamaños para un mismo grado de cocción.

En vista de estos resultados, si se quisiese utilizar la pérdida de peso como criterio para finalizar la cocción, los intervalos de pérdida de peso para los diferentes grados de cocción serían: para *Grado 1* entre 3-7%, para *Grado 2* entre 7-8.5%, para *Grado 3* entre 8.5-10%, para *Grado 4* entre 10-15% y para *Grado 5* entre 15-20%.

La elección de la pérdida de peso como parámetro de referencia para estimar los tiempos de cocción de filetes de diferentes grosores es una opción prometedora por varias razones: las temperaturas internas así obtenidas para los diferentes grosores son similares (± 2 °C), la medición del peso puede implementarse en placas de inducción en el futuro, y supera la dificultad de medir la temperatura exactamente en el centro geométrico del filete ya que, como hemos visto, una pequeña desviación en el grosor del filete implica

un cambio en la medición de la temperatura central del mismo orden de magnitud que entre algunos grados de cocción.

4.1.4 Influencia de la conservación previa en las propiedades de la carne cocinada

La caracterización de los grados de cocción y la determinación de la cinética de cambio de color de la carne sometida a tratamientos térmicos se había realizado en carne fresca, es decir en carne cocinada el mismo día de su adquisición pasados 7 días desde el sacrificio. Sin embargo, se consideró interesante conocer qué influencia podía tener sobre el comportamiento durante el cocinado que la carne se hubiese sometido a procesos de conservación típicos del ámbito doméstico, como la refrigeración y la congelación.

4.1.4.1 Caracterización de las muestras antes del tratamiento culinario

Con el fin de caracterizar la carne antes del proceso de cocinado para estudiar las diferencias previas de las que partimos debido al método de conservación empleado, se analizaron distintos parámetros de la carne cruda en las diferentes condiciones de conservación: sin periodo de conservación (fresca), conservada en nevera 7 días a 4°C (refrigerada) y conservada en congelación desde el día de adquisición durante 7 días (congelada).

En la Tabla IV- 6 se muestran los resultados de los parámetros físico-químicos determinados. La humedad de la carne era similar para las tres condiciones de conservación, sin diferencias significativas para $p < 0,05$. Lo mismo puede decirse del pH, cuyos valores están comprendidos entre 5,62 y 5,64. Mientras que el músculo de los mamíferos tiene un pH de alrededor de 7, debido a las consecuencias del metabolismo energético muscular post-mortem, donde el músculo se vuelve anaeróbico después del sacrificio y el glucógeno se convierte en lactato a través de la vía glucolítica, se produce una acumulación de iones de hidrógeno que hace que se el pH de la carne disminuya a valores entre 5,4 a 5,6 (Kim et al., 2014; Varnam et al., 1995; Young et al., 2004). La refrigeración y la congelación ocasiona un aumento del pH debido al deterioro del tejido muscular, pero esto ocurre en carnes con un almacenamiento prolongado, de 12 semanas o más en carne envasadas (Hughes et al., 2015), y hasta 6 semanas en congelación (Kim et al., 2011), y aun en estos casos el pH se incrementó moderadamente de 5,54 a 5,74.

Por lo tanto, lo esperable era que con periodos de conservación de 7 días no se llegaran a producir modificaciones del pH.

La capacidad de retención de agua (CRA) es un parámetro que se relaciona con la jugosidad de la carne y con las pérdidas por cocción. La CRA se ha expresado como porcentaje de agua retenida tras ser sometida a una compresión. La carne que presentó una menor CRA fue la carne refrigerada (44,4 %) mientras que la carne congelada fue la de mayor CRA (52,22 %) aunque sin diferencias significativas con la carne fresca (49,44 %). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Cho et al. (2017) en carne de vacuno congelada durante distintos tiempos. Estos autores obtuvieron valores similares de la CRA en carne fresca y en carne conservada durante 9 meses en congelación. Sin embargo, estos resultados difieren de los obtenidos por Lagerstedt et al. (2008) que obtuvieron mayores pérdidas de agua en la carne congelada que en la refrigerada. El daño producido en las membranas celulares durante la formación de los cristales de hielo podría ser la causa de la menor capacidad de retención de agua (Rahelić et al., 1985) y de una mayor pérdida de peso durante la cocción (Wheeler et al., 1990). Coombs et al. (2017), en su trabajo de revisión sobre la conservación de carne roja en refrigeración y congelación, concluye que a pesar de la disminución de la CRA que origina la conservación en refrigeración, este método de conservación raramente ocasiona un efecto negativo en la apreciación sensorial de la jugosidad de la carne, y que la conservación en congelación origina una disminución en la CRA comparada con la carne fresca y la refrigerada debido a la pérdida de líquidos durante la descongelación.

Tabla IV- 6. Parámetros físico-químicos para la caracterización de la carne cruda conservada en diferentes condiciones.

Conservación	Humedad (g agua/100 g b.h)	CRA (%)	pH	L*	a*	b*
Fresco	74,61± 0,58a	49,44± 2,18b	5,64±0,05a	45,23±0,99a	13,55±0,63a	12,92±0,71a
Refrigeración	73,45± 0,89a	44,05± 2,29a	5,62±0,07a	45,43±0,50a	13,27±0,30a	13,14±0,25a
Congelación	74,20± 0,23a	52,22± 3,31b	5,63±0,05a	45,44±0,51a	13,11±0,28a	13,87±0,42b

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre diferentes condiciones de conservación.

En cuanto al color, los valores de las coordenadas CIELab concuerdan con los de otros estudios llevados a cabo con carne de vacuno fresca (Freitas et al., 2016). Los valores obtenidos por Kondjoyan et al. (2014) también son similares a los obtenidos en este estudio ($L^* = 46,20$, $a^* = 10,18$ y $b^* = 10,98$), pero difieren de otros estudios como el

de Fernández et al. (2007), y es que son muchos los factores que pueden afectar al color de la carne. El pH alto, el envasado en atmósfera modificada, la descongelación rápida y el contenido de grasa son factores que cambian la proporción de las diferentes formas de mioglobina que es el principal pigmento responsable del color de la carne (King y Whyte, 2006). En este estudio no se han obtenido diferencias significativas ni en la tonalidad roja de la carne cruda ni en la luminosidad entre las distintas condiciones de conservación. Se sabe que el almacenamiento prolongado en refrigeración en un entorno aeróbico conduce a una mayor oxidación de la mioglobina a metamioglobina, lo que contribuye a un color más marrónceo (Coombs et al., 2017). En el trabajo de Vieira et al. (2009), en el que estudiaban el efecto de las condiciones de almacenamiento en congelación de la carne desde 30 días a 90 días, vieron cómo los valores $L^*a^*b^*$ también disminuyeron a medida que aumenta la duración del almacenamiento por congelación. Pero es importante señalar que en estos estudios se observaron cambios significativos de color después de los 30 días de almacenamiento, tiempo de almacenamiento mucho más prolongado que en nuestro estudio.

La terneza se define como la facilidad de masticación por parte del consumidor y se ha identificado como uno de los factores principales que influye en la calidad percibida, particularmente en el caso de la carne de ternera (Miller et al., 2001). Los distintos parámetros de textura obtenidos en el ensayo de TPA se muestran en la Tabla IV- 7. La carne congelada presentó valores significativamente mayores que la carne fresca y la refrigerada ($p < 0,05$) en todos los parámetros estudiados (dureza, elasticidad, cohesividad y masticabilidad). Estos resultados coinciden con los de Choi et al. (2018) y Kim et al (2013) que también apreciaron un incremento en los parámetros de textura de la carne congelada con respecto a la fresca. La formación de cristales de hielo puede causar daños en la membrana celular y, en consecuencia, la liberación de varios compuestos, como enzimas, nucleótidos y aminoácidos, en el exudado de la carne (Hamdy et al., 2020). Este efecto gana importancia a medida que aumenta el tamaño de los cristales, lo que ocurre cuando la congelación se produce con un descenso lento de la temperatura. A medida que la carne exuda más agua durante el proceso de descongelación la textura de la carne sufre algunos cambios negativos en este proceso (Kim et al., 2013). Algunos estudios señalan que el almacenamiento en refrigeración trae como consecuencia que el sistema calpaina degrade progresivamente las proteínas miofibrilares en un proceso conocido como

proteólisis originando un incremento en la ternura de la carne (Colle et al., 2015; Hughes et al., 2015; Lagerstedt et al., 2008). Sin embargo, en nuestro caso la carne conservada en refrigeración no resultó ser más tierna, lo cual puede deberse a que no se ha alcanzado el umbral de tiempo en refrigeración para que este efecto se produzca. El tiempo en refrigeración para lograr la ternura óptima de carne de ternera varía entre 2 a 3 semanas a 1-2 °C (Shanks et al., 2002) y 12 semanas a -1 °C (Hughes et al., 2015).

Tabla IV- 7. Valores de los parámetros de textura de la carne cruda conservada en diferentes condiciones

Conservación	Dureza (N)	Elasticidad	Cohesividad	Masticabilidad (N)
Fresco	71,4±8,9a	0,75±0,06a	0,51±0,04a	27,8±5,6a
Refrigeración	74,4±13,9a	0,73±0,14a	0,52±0,03a	29,2±11,3a
Congelación	105,5±14,1b	0,81±0,11b	0,60±0,06b	51,4±10,5b

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre diferentes condiciones de conservación.

4.1.4.2 Influencia de las condiciones de conservación en la cinética de cambio de color de la carne

Para establecer si las condiciones de conservación influyen en la evolución del color durante el tratamiento térmico, se ha calculado para los tres casos estudiados (fresco, refrigeración y congelación) la variación del color absoluto, ΔE^* , puesto que este parámetro proporciona una información global del cambio en el color.

Los datos de ΔE^* a diferentes tiempos y temperaturas se muestran en la Figura IV- 11. El color absoluto sigue la misma tendencia que la luminosidad, indicando que la coordenada L^* es la que más cambia durante el calentamiento. La evolución del color absoluto para las muestras refrigeradas o congeladas fue similar a las de la carne fresca. Las diferencias en el color absoluto entre las condiciones fueron pequeñas, < 1 , en prácticamente todos los tiempos y temperaturas, lo que indica que no eran detectables visualmente (Abril et al., 2001). Por lo tanto, la cinética de color obtenida con la carne fresca podría aplicarse para predecir los cambios de color durante la cocción, independientemente del método de conservación doméstico utilizado, si las condiciones de conservación son similares a las que se presentan aquí.

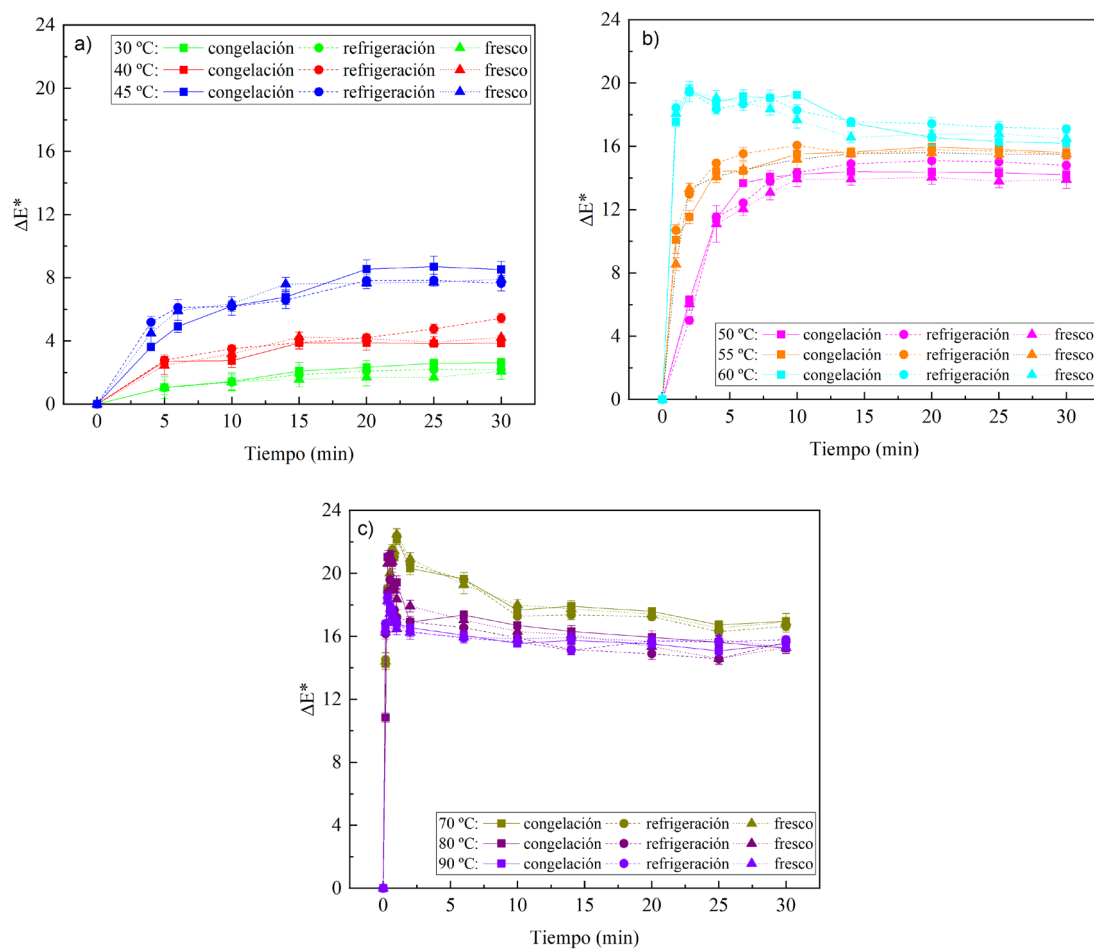


Figura IV- 11. Evolución del color absoluto (ΔE^*) para las tres condiciones de conservación (congelación, refrigeración y fresco) a diferentes temperaturas: a) 30, 40 y 45 °C, b) 50, 55 y 60 °C y c) 70, 80 y 90 °C

4.1.4.3 Influencia de las condiciones de conservación en el color de la carne cocinada

Corroborada la validez de la cinética de cambio de color para las condiciones de conservación más utilizadas en el ámbito doméstico, se quiso también comprobar que las diferentes condiciones de conservación no influían en el desarrollo del color de la carne durante su cocinado. De forma análoga a cómo se había medido el color en el interior de la carne fresca se procedió a la determinación de las coordenadas CIELab en una pequeña zona (3x3 mm) entorno al centro geométrico de la carne conservada en refrigeración y en congelación. Para este estudio se utilizaron trozos de carne de 1,9 cm de grosor. En la Figura IV- 12 se muestran los resultados de las coordenadas de color L^* y a^* para los cinco grados de cocción definidos por las condiciones mostradas en la Tabla IV- 3. Siguiendo el mismo patrón de la carne fresca (apartado 4.1.4.1) la luminosidad de la carne aumentó con la intensidad de los grados de cocción hasta el Grado 3, momento a partir

del cual se estabilizó, en concordancia con los datos obtenidos en el estudio cinético (Figura IV- 3). Al igual que sucedía en la carne fresca, la coordenada de color a^* experimentó un ligero aumento durante los primeros minutos de cocinado con respecto a los valores de la carne cruda, pero no se aprecian diferencias significativas entre los distintos grados de cocción, hasta el grado de cocción 5 en el que se observó un importante descenso coincidiendo con la pérdida de la característica tonalidad rosácea en el centro de la carne.

Con respecto a la influencia de las condiciones de conservación en el cambio de color podemos concluir que no hay una tendencia clara en la coordenada L^* . Para el Grado 1 la carne más luminosa es la congelada, pero para el Grado 2 lo es la refrigerada, para el Grado 3 y 4 la menos luminosa es la refrigerada que se vuelve a presentarse como la más luminosa para el Grado 5. Este comportamiento refuerza la idea de que el color medido en una zona muy concreta del centro del alimento no puede utilizarse como parámetro para caracterizar los grados de cocción. Además, las condiciones de conservación utilizadas no afectan a la coordenada a^* con la que se suele caracterizar los distintos grados de cocción.

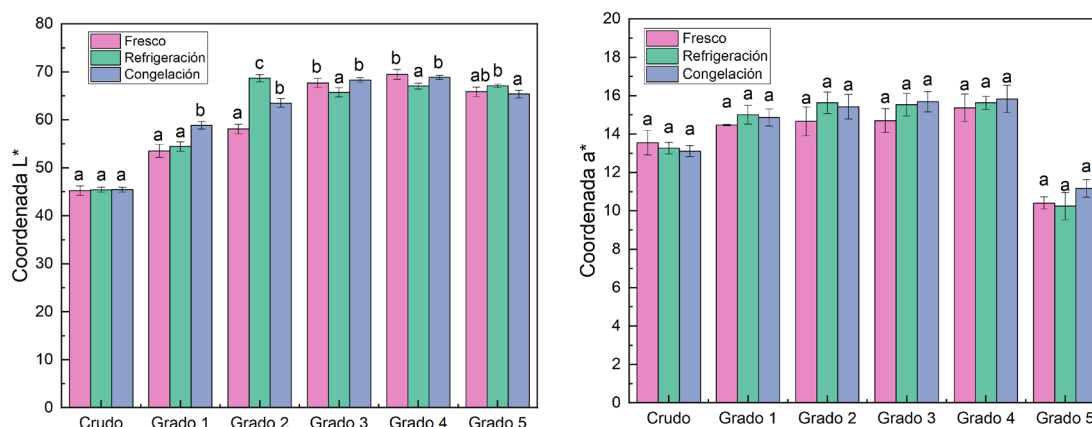


Figura IV- 12. Coordenadas L^* (izqda) y a^* (dcha) en la zona central de piezas de lomo de ternera con diferentes grados de cocción que se habían conservado en fresco, en refrigeración y en congelación. Valores con diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre condiciones de conservación

4.1.4.4 Influencia de las condiciones de conservación de la carne en la pérdida de peso durante el cocinado

En la Figura IV- 13 se representa la pérdida de peso de trozos de lomo de ternera de 1,9 cm de grosor tras dos minutos de reposo después del cocinado para los cinco grados

de cocción. Los resultados muestran cómo la pérdida de peso va aumentando con el tiempo de cocción para las tres condiciones de conservación. Las pérdidas de peso están comprendidas entre un 4,0 % para el Grado 1 y un 20,6 % para el Grado 5. En cuanto a la influencia de las condiciones de conservación, hay que destacar que la carne que mayores pérdidas de peso experimentó fue la refrigerada, no existiendo diferencias significativas entre la fresca y la congelada. Este resultado era esperar ya que la carne almacenada en refrigeración presentaba en crudo menor capacidad de retención de agua que la carne fresca o congelada (Tabla IV- 6). No hubo diferencias en la evolución de la temperatura en el centro de la carne durante el cocinado para las diferentes condiciones de conservación, y por lo tanto la Figura IV- 5 elaborada con los datos de la carne fresca es válida para la carne refrigerada y congelada. Estos resultados coinciden con los de Cheng et al. (2020) que estudian la influencia en la calidad de la carne de vacuno congelada y descongelada frente a la refrigerada durante 5 días. En ese trabajo, la carne conservada en refrigeración experimentó la mayor pérdida por cocción (40%) frente a la que había sido congelada (37%). Los porcentajes de pérdida de peso de estos autores difieren considerablemente de los aquí mostrados, pero hay que tener en cuenta que utilizan otro medio de cocción y la carne alcanzaban una temperatura en el centro del producto (70 °C).

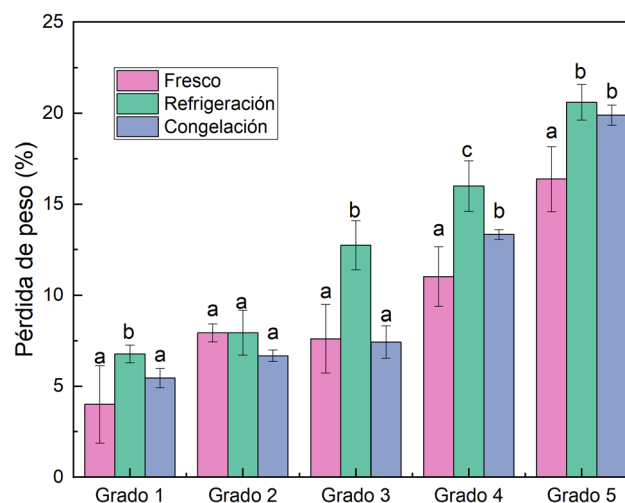


Figura IV- 13. Pérdida peso de trozos de lomo de ternera de 1,9 cm de grosor tras diferentes grados de cocción, conservados en fresco, en refrigeración y en congelación. Diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre distintas condiciones de conservación.

4.1.4.5 Influencia de las condiciones de conservación de la textura de la carne cocinada

La textura de la carne es sin duda la cualidad que aprecian más los consumidores. El análisis de perfil de textura (TPA) brinda información detallada sobre las características texturales de la carne (de Huidobro et al., 2005). Entre los parámetros de textura, la terneza se considera el atributo de calidad más importante de la carne de vacuno (Chen et al., 2020). La elasticidad también es un parámetro relacionado con la frescura de la carne, y depende principalmente de la estructura muscular, de las características físico-químicas del tejido conectivo, y también de la humedad, de la fracción de grasa líquida y de las proteínas miofibrilares (Xiong et al., 2015). La masticabilidad también es otro parámetro de textura importante que en el análisis instrumental de textura se calcula como el producto de la dureza, la cohesión y la elasticidad. Es un parámetro de gran utilidad para el estudio de carne cocinada ya que describe la energía requerida para masticar la carne y desintegrarla hasta que se pueda deglutir (Pematilleke et al., 2021).

En la Figura IV- 14 se muestran la dureza y la masticabilidad, obtenidas con los test TPA, para los cinco grados de cocción en carne con diferentes condiciones de conservación. Tanto la dureza como la masticabilidad aumentan al prolongar el tiempo de cocinado, pero se puede apreciar una excepción en el Grado 2, ya que los valores obtenidos fueron menores que para el Grado 1. Este comportamiento ha sido descrito en otros estudios que analizan con detalle el efecto de la temperatura de cocción en las propiedades mecánicas de la carne. La carne aumenta su dureza en dos periodos diferenciados uno a bajas temperaturas de cocción (40-50 °C) y posteriormente en otro por encima de 60 °C. Estos aumentos de la dureza se han asociado a la retracción térmica del tejido conectivo y a la desnaturalización por el calor de las proteínas miofibrilares, respectivamente (Bouton y Harris, 1981). Sin embargo, la dureza de la carne disminuye entre 50 y 60 °C. Los motivos que se han argumentado para explicar esta disminución son la menor resistencia a la ruptura del tejido conjuntivo perimisial (Christensen et al., 2000) y a la formación de un gel de proteínas sarcoplásmicas que unen las fibras y los haces de fibras y reducen el flujo viscoso aumentando la facilidad para su fractura durante la masticación (Tornberg, 2005). Comparando entre las diferentes condiciones de conservación se observó que la carne conservada en refrigeración es más dura y requiere de más energía para masticarla. También, como hemos podido observar en la Figura IV-

13, coincide que es la carne que más peso pierde durante su cocinado. Esto es así cuando la carne se cocina hasta que el centro supera los 58 °C (Grado 4 y Grado 5). Para otros grados de cocción más suaves no se encontraron diferencias significativas entre condiciones de conservación ($p < 0,05$).

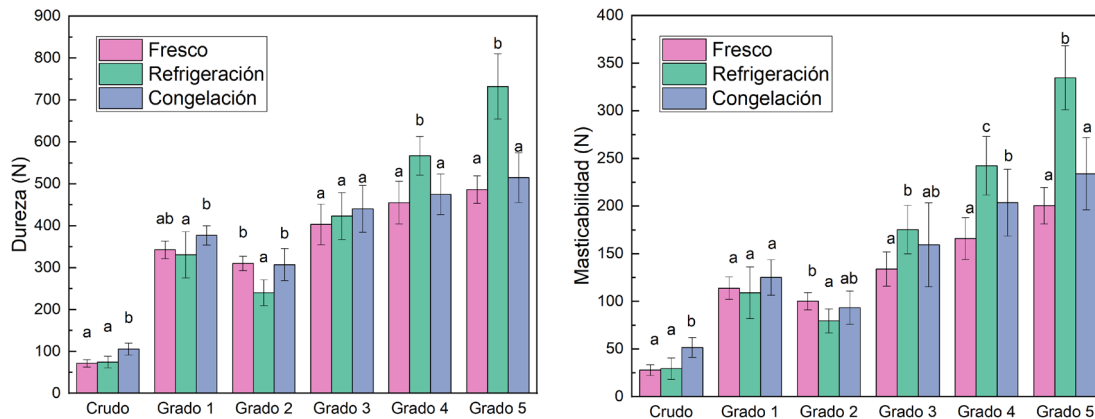


Figura IV- 14. Evolución de la dureza (izqda) y la masticabilidad (dcha) de la carne en función del grado de cocción para las tres condiciones de conservación. Valores con diferentes letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre diferentes condiciones de conservación

En crudo se parte de un producto con mayor dureza y masticabilidad cuando la carne había sido congelada (Tabla IV- 7). Sin embargo, la menor capacidad de retención de agua de la carne refrigerada es el factor que influye decisivamente en la jugosidad, terneza y masticabilidad de la carne cocinada. La congelación puede tener un efecto beneficioso sobre la terneza de la carne debido a la alteración celular por la formación de cristales (Botinestean et al., 2016; Grayson et al., 2014). Grayson et al. (2014) demostraron que la congelación a -26 °C durante 30 días tenía un efecto beneficioso sobre la terneza de la carne. En nuestro caso, este efecto no se ha apreciado ya que la carne congelada era más dura antes del cocinado, pero posiblemente ni el tamaño de los cristales formados, ni el periodo de congelación son comparables. Por otra parte, la congelación puede aumentar las pérdidas de líquidos sobre todo durante el periodo de descongelación. A través de la congelación rápida es posible que se puedan mitigar estas pérdidas. Sin embargo, en el estudio de Hergenreder et al. (2013), en el que compararon diferentes métodos de procesamiento congelación rápida/lenta y descongelación rápida/lenta, se concluyó que la velocidad de congelación no afectaba a las pérdidas, pero que mediante una descongelación rápida se producían mayores pérdidas. Esto puede explicarse porque durante la congelación la velocidad de proteólisis se altera debida a la reducción de la

actividad de la calpaína, pero durante el periodo de descongelación se reactivan las proteasas normalmente a una velocidad mayor que antes de la descongelación, por lo que la velocidad de descongelación es muy importante en la terneza final de la carne congelada. En consecuencia, el efecto de la congelación en la terneza de la carne depende de cuándo y cómo se realice esta medida y de la forma en la que se ha realizado el proceso de congelación/descongelación (Coombs et al., 2017).

4.1.5 Influencia de las condiciones de cocinado en el grado de cocción

Todos los resultados mostrados hasta ahora corresponden con cocciones realizadas con la carne a una temperatura inicial de 20 °C y con una temperatura en la superficie de la sartén de 215 °C. Por ello, se consideró útil analizar la influencia de otras condiciones de cocinado en el grado de cocción de la carne.

4.1.5.1 Influencia de la temperatura inicial de la carne

Aunque lo recomendable desde el punto de vista culinario es que se cocine la carne una vez que ésta se haya atemperado (Hopia y Fooladi, 2019), la realidad del entorno doméstico es que no siempre se sigue esta recomendación y se cocina la carne inmediatamente después de sacarla del frigorífico. La pregunta que nos planteamos fue cuánto tiempo se debe de prolongar la cocción para obtener la misma temperatura final, y por lo tanto el mismo grado de cocción, cuando la carne inicialmente está a 5 °C, con respecto a los tiempos de cocinado cuando la carne está a 20 °C.

En base a los resultados anteriores se ha concluido que la pérdida de peso es un parámetro útil para caracterizar los grados de cocción. Esto se quiso corroborar utilizando la pérdida de peso para establecer los tiempos de cocinado con los que obtener los mismos grados de cocción cuando la temperatura inicial de la carne era de 5 °C que cuando era de 20 °C. Para ello se realizaron cocciones con la carne a 5 °C en las que la duración de las mismas se fijaba con el criterio de que la pérdida de peso final debía de ser la misma que la obtenida con la carne a 20 °C. En la Figura IV- 15 se muestra la evolución de la pérdida de peso para las dos temperaturas iniciales de la carne. Se puede observar que, para todos los grados de cocción, a excepción del Grado 5, hay que prolongar el tiempo de cocción cuando la temperatura inicial de la carne es menor para que se alcance la misma pérdida de peso.

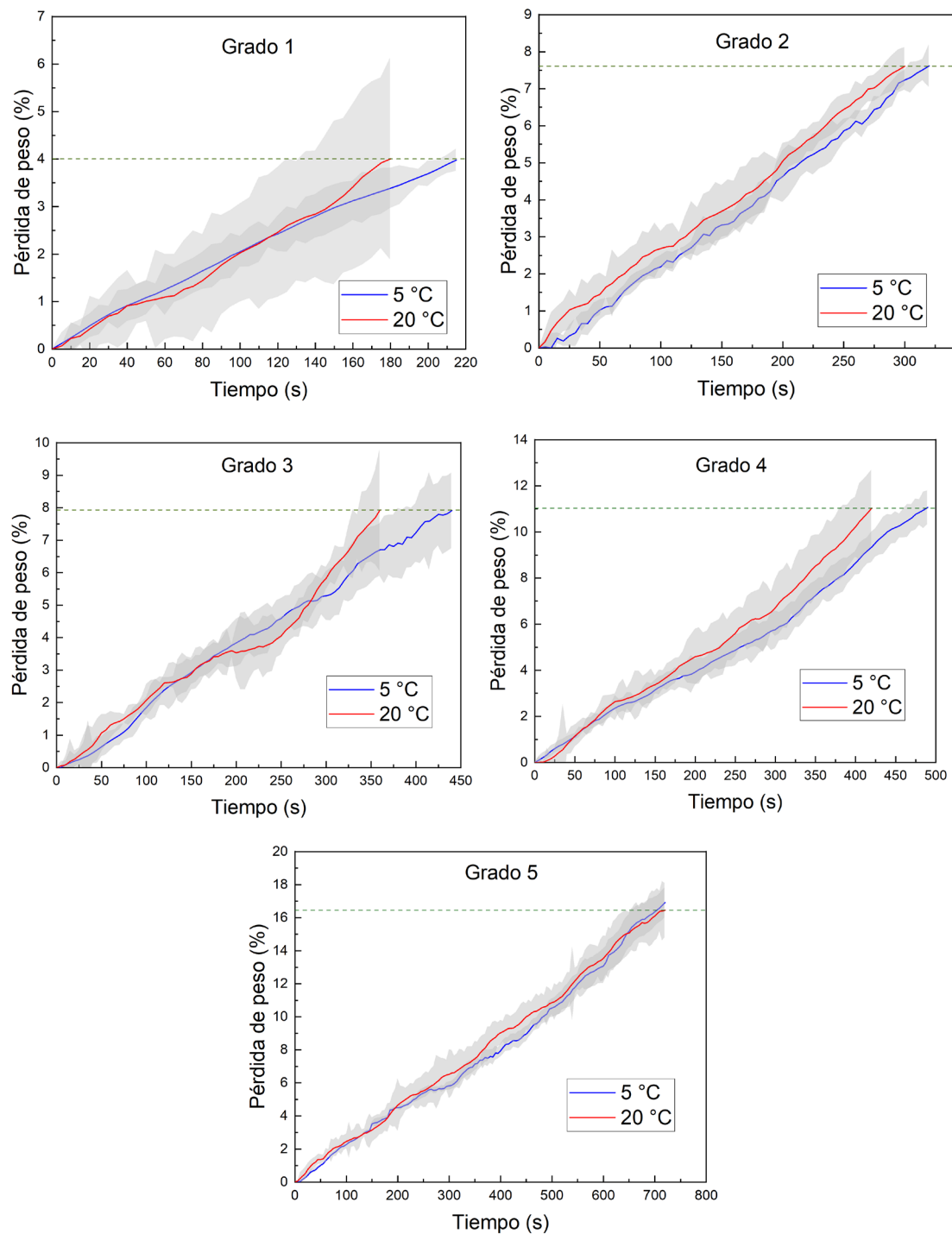


Figura IV- 15. Evolución de pérdida de peso en trozos de lomo ternera de 1,9 cm de espesor cocinados con una temperatura inicial de 5 °C y de 20 °C para los cinco grados de cocción.

Una vez determinados los tiempos de cocción para la carne que estaba inicialmente a 5 °C hubo que comprobar si efectivamente la temperatura alcanzada en el centro del producto al final del cocinado era similar cuando se partía de carne a 5 °C que cuando estaba a 20 °C. En la Figura IV- 16 se muestra la evolución de la temperatura central durante el cocinado de la carne con temperatura inicial de 5 °C y 20 °C para los

cinco grados de cocción. Se puede observar que si se cocinase la carne a 5 °C durante el mismo tiempo que a 20 °C no se alcanza la temperatura final establecida para cada grado de cocción. Sin embargo, cuando se prolonga el tiempo con el fin de que la pérdida de peso sea la definida para cada grado de cocción, la temperatura central final es la deseada.

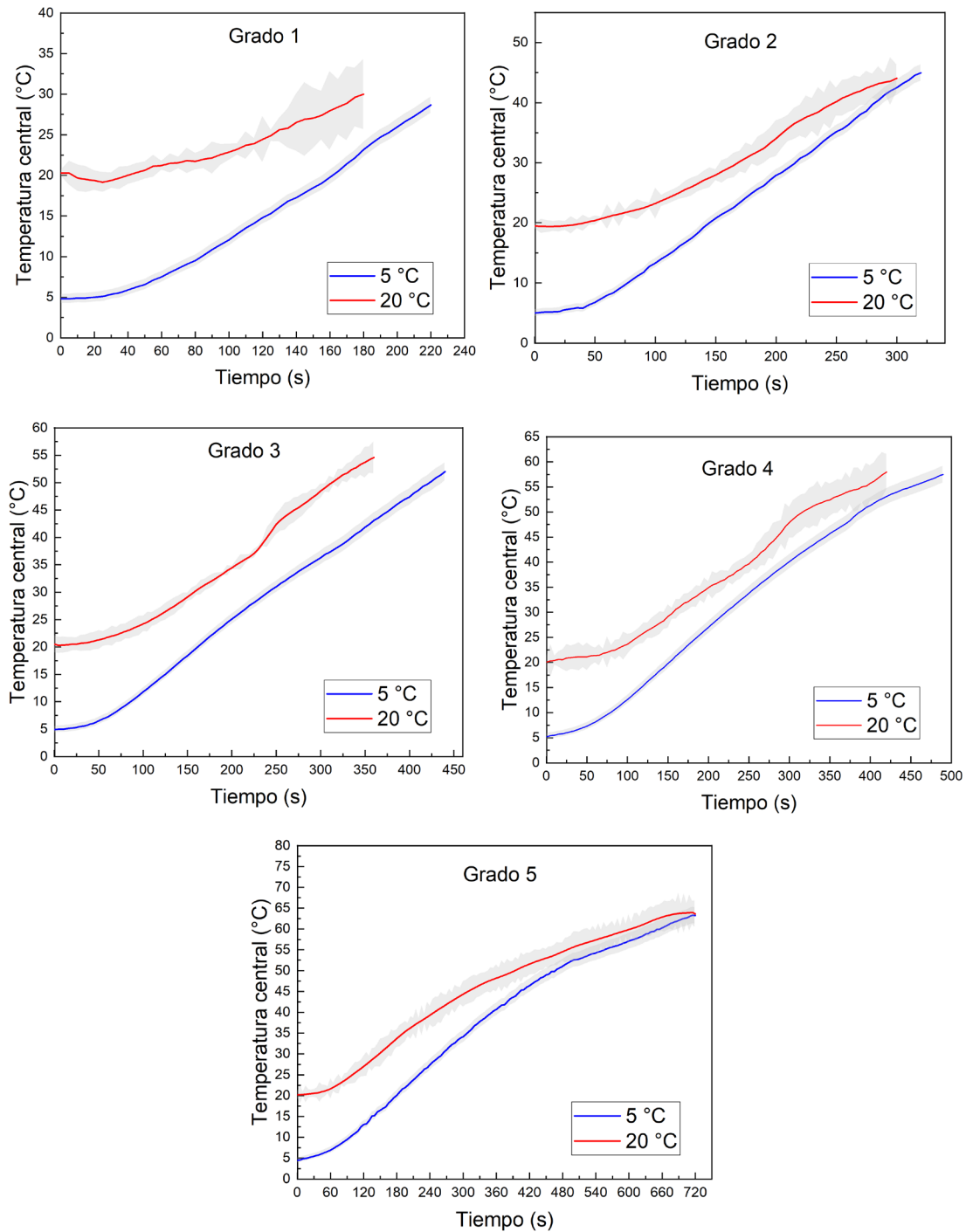


Figura IV- 16. Evolución de temperatura central en trozos de lomo ternera de 1,9 cm de espesor cocinados o con una temperatura inicial de 5 °C y de 20 °C para los cinco grados de cocción.

En la Tabla IV- 8 se muestra un resumen de la pérdida de peso y de la temperatura central al final del cocinado para los distintos grados de cocción y para las dos temperaturas iniciales de la carne. Como podemos observar cuando las muestras han alcanzado la pérdida de peso específica propia de cada grado de cocción, la temperatura central final que tienen es la establecida para cada grado de cocción. Por lo que caracterizar el grado de cocción a través de la pérdida de peso es útil para una asistencia al cocinado a nivel doméstico.

Tabla IV- 8. Pérdida de peso (PP) y temperatura central (T_c) al final de la cocción en trozos de lomo de ternera de 1,9 cm de grosor para diferentes grados de cocción y temperaturas iniciales de la carne (T_i=20 °C y T_i=5 °C).

GRADO DE COCCIÓN	PP (%)	Tiempo de cocción (s) para T_i=20 °C	Tiempo de cocción (s) para T_i=5 °C	T_c (°C) para T_i=20 °C	T_c (°C) para T_i=5 °C
Grado 1	4,00±2,13	180	220	30,0±4,31	28,7±1,00
Grado 2	7,60±1,87	300	320	44,1±2,32	44,9±1,36
Grado 3	7,93±0,49	360	440	54,7±2,91	52,1±1,61
Grado 4	11,03±1,64	420	490	57,9±3,60	57,5±1,66
Grado 5	16,38±1,79	720	720	63,6±3,17	63,9±1,98

4.1.5.2 Influencia de la temperatura de la sartén

Se analizó la influencia de la temperatura en la superficie de la sartén realizando cocciones a 215 °C y a 180 °C utilizando para ello dos niveles de la opción Frying Sensor de la placa de inducción (nivel 5 y 4, respectivamente). Estos ensayos se realizaron con trozos de lomo de ternera de 1,9 cm de grosor con una temperatura inicial de 20 °C cocinados durante 420 s.

En la Figura IV- 17 se muestra la evolución de la temperatura central y de la pérdida de peso de la carne cocinada a 215 °C y a 180 °C. A pesar de que la temperatura en la sartén difiere en 35 °C, al final de la cocción existe solamente una diferencia de 4 °C en el centro de la carne. Esto puede ser debido a que el calor que la placa de inducción aporta a la carne se invierte fundamentalmente en la evaporación del agua y por lo tanto los perfiles de temperatura a lo largo del espesor de la carne son muy parecidos independientemente de la temperatura de la sartén y que, aunque se prolongase el tiempo de cocción, la temperatura en el centro de la carne no superaría los 100 °C mientras la carne tuviese agua libre que poder evaporar.

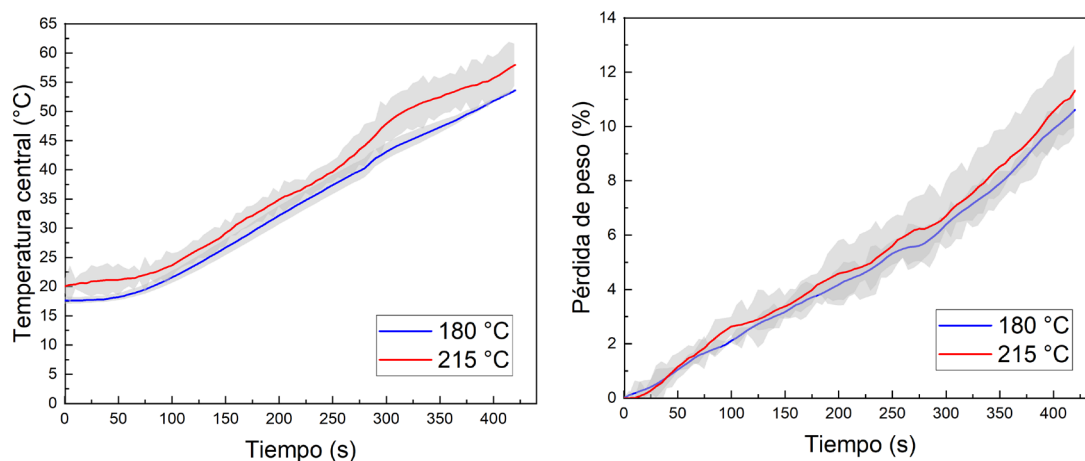


Figura IV- 17. Evolución temperatura central (izqda) y de la pérdida de peso(dcha) en el cocinado de trozos de lomo de ternera de 1,9 cm de grosor cocinados a 215 °C y a 180 °C durante 420 s.

En la Figura IV- 17 se puede observar también que la evolución de la pérdida de peso fue similar para las dos temperaturas de la sartén ensayadas. Sin embargo, Pematilleke et al. (2021) obtuvieron diferencias acusadas en las pérdidas por cocción para el cocinado de ternera a tres temperaturas diferentes (65, 75 y 85 °C) cuando la temperatura de cocción aumentaba en 20 °C las pérdidas de peso fueron el doble. Pero su cocción fue con un tiempo más prolongado, 30 min. Dagerskog (1979) encontró que la influencia de la temperatura de cocción (140 y 180 °C) en el desarrollo de la temperatura central es insignificante. Por otro lado, Pan et al. (2000) en base a su modelo predictivo, estiman que la temperatura de fritura tiene una gran influencia en la temperatura central de la hamburguesa, donde un cambio del 10% de la temperatura de la sartén puede resultar en un cambio del 20% en la temperatura central. En el trabajo de Oroszvari et al. (2005) la temperatura de la sartén tuvo un impacto significativo en la pérdida de agua. A una temperatura de 100 °C, cuando la formación de costra superficial es mínima y no se produce una evaporación significativa del agua, la pérdida de agua se produce principalmente en forma de goteo. Al aumentar la temperatura de la sartén a 175 °C, la pérdida de flujo de agua se duplicó debido a la evaporación. Pero la pérdida de agua basada en el agua inicial en forma de goteo constituyó alrededor del 80 % de la pérdida de agua incluso a 175 °C.

4.1.5.3 Influencia del número de piezas

También se ha analizado la influencia de la cantidad de producto que se cocine. Para realizar este estudio se realizaron cocciones con 1 y con 3 trozos de lomo de ternera

de 1,9 cm de grosor, con una temperatura de sartén de 215 °C y de 180 °C, y durante los tiempos de cocción correspondientes a los grados de cocción 4 y 5.

En la Tabla IV- 9 se muestran los resultados obtenidos en cuanto a consumo energético durante el cocinado, la temperatura central de la carne y la pérdida de peso al final de la cocción. Como se puede observar el cocinado con diferente carga de producto no modifica las propiedades de cocinado en cuanto a temperatura central y a pérdida de peso. Sin embargo, sí se aprecia un incremento en el consumo energético cuando aumenta la cantidad de producto para poder mantener la temperatura en la sartén en el punto de consigna elegido.

Tabla IV- 9. Variación de la pérdida de peso (PP), temperatura central de la carne (T_c) y consumo energético con la cantidad de carne cocinada para diferentes grados de cocción y temperaturas de la sartén

GRADO DE COCCIÓN	Unidades	Tiempo (s)	T Sartén (°C)	Consumo (Wh)	T_c (°C)	PP (%)
Grado 4	1	420	217,3 ± 1,5	42,0 ± 1,6a	58,0 ± 3,6a	11,3 ± 1,7a
Grado 4	3	420	216,4 ± 1,1	51,8 ± 1,7b	55,6 ± 1,3a	11,7 ± 0,7 a
Grado 4	1	420	186,9 ± 1,4	36,6 ± 0,6a	53,6 ± 0,2a	10,6 ± 0,7a
Grado 4	3	420	185,3 ± 0,6	43,5 ± 0,1b	52,5 ± 0,8 a	11,0 ± 0,8a
Grado 5	1	720	215,1 ± 1,5	73,6 ± 0,8a	72,2 ± 3,2 a	18,9 ± 1,6
Grado 5	3	720	217,3 ± 1,1	88,9 ± 0,1b	69,5 ± 1,2 a	20,2 ± 0,5
Grado 5	1	720	185,5 ± 2,2	62,7 ± 1,7a	67,0 ± 1,9a	18,3 ± 1,0a
Grado 5	3	720	186,3 ± 0,6	71,6 ± 0,7b	66,2 ± 0,6a	18,6 ± 1,0a

Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0,05) entre diferentes unidades para un mismo grado de cocción y temperatura de sartén.

4.1.6 Modelado matemático del cocinado de carne de ternera por contacto con una superficie caliente

En colaboración con el grupo de investigación de Mecánica Aplicada y Bioingeniería (AMB) del IA3 se ha desarrollado un modelo numérico de elementos finitos 3D para simular la cocción de carne de ternera por contacto con una superficie caliente. Nuestra contribución al modelo ha consistido en:

- i. Establecer las suposiciones del modelo en base a las evidencias experimentales.
- ii. Obtención de parámetros experimentales que el modelo requiere como datos de entrada (propiedades reológicas, cambios cinéticos y capacidad de retención de agua).

- iii. Verificación y validación del modelo comparando los resultados obtenidos con el modelo con los experimentales para diferente espesores y grados de cocción de la carne.
- iv. La aplicación práctica para la asistencia al cocinado.

La variación con la temperatura del módulo de almacenamiento (G'), del módulo de pérdida (G'') y la capacidad de retención de agua (CRA) se determinó experimentalmente a partir de los ensayos reológicos. Estos datos, por una parte, sirvieron de base para el análisis de los cambios que experimenta la carne durante su cocción, y por otra, se utilizaron como parámetros de entrada del modelo matemático para simular las modificaciones que sufre la carne durante el proceso de cocción por contacto con una superficie caliente. La cinética de cambio de color de la carne que se determinó a partir de datos experimentales (apartado 4.1.2) se incorporó al modelo para simular el cambio de color en el interior de la carne durante el cocinado.

4.1.6.1 Descripción y suposiciones del modelo

El modelo que se planteó pretendía simular adecuadamente el proceso de cocción por contacto con una superficie caliente de carne de ternera. Para ello tiene en cuenta simultáneamente la transmisión de calor, la transferencia de materia y la deformación de la carne. Las suposiciones en las que se basa el modelo son:

- La carne se consideró como un material poroso continuo bifásico (líquido-sólido). Por simplicidad se supuso que la estructura de la carne era homogénea. En este caso la mayor parte de la carne no alcanza temperaturas muy altas por lo que se puede despreciar la existencia de poros más grandes en la superficie como sí que se ha considerado en otros modelos aplicados a la cocción en horno (Feyissa et al., 2013).
- Debido a la naturaleza gomosa de la carne, se consideró como un material hiperelástico en el que el cambio de volumen total era motivado por la pérdida de agua y, en consecuencia, la matriz sólida permanecía saturada.
- Se supuso que la temperatura era la misma para las dos fases.
- El transporte de agua en el interior de la carne no solamente se produce por difusión. Debido a la contracción del tejido conectivo se genera una gradiente

- de presión en la solución acuosa de los espacios extracelulares que origina un transporte convectivo de agua que se puede describir según la ley de Darcy.
- En las proximidades de la superficie de calentamiento la temperatura aumenta muy rápidamente de forma que la capacidad de retención de agua cae bruscamente y lo hace de una forma más rápida que la velocidad de evaporación del agua originando el fenómeno conocido como “goteo” (*drip*) (Hughes et al., 2014). En la superficie en contacto con la sartén se consideraron ambos fenómenos, evaporación y “goteo”. Mientras que en las superficies laterales de la carne solamente se tuvo en cuenta el fenómeno de “goteo” y en la cara superior se supuso que ninguno de los dos fenómenos ocurría. Esas consideraciones se han tenido en cuenta en base a la observación de lo que acontecía durante el cocinado como se pudo apreciar en la Figura IV- 18.
 - Se asumió que la deformación de la carne debida a la temperatura es pequeña y puede despreciarse. La pérdida de agua y la deformación elástica de carne que en la realidad ocurren constituyendo un complejo fenómeno conjunto en el modelo se han considerado como dos procesos ficticios; uno asociado con el cambio en el volumen de agua y otro con la deformación elástica de la fase sólida (Figura IV- 19).



Figura IV- 18. Condiciones de contorno consideradas en el modelo del cocinado de carne por contacto con una superficie caliente.

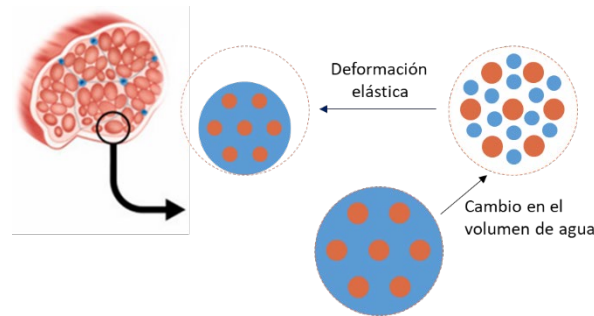


Figura IV- 19. Procesos de deformación de la carne.

Este modelo se implementó en el software COMSOL Multiphysics 5.2a. El modelo computacional 3D incluye dos partes diferenciadas, por un lado, la sartén de aluminio de 210 mm de diámetro y 5 mm de espesor y por otro, la carne que se ha considerado inicialmente como un cuboide. Un reto del cocinado por contacto en superficie caliente es la necesidad de dar la vuelta a la carne, recomendándose incluso dar más de una vuelta (Myhrvold et al., 2011). Por lo tanto, nos planteamos cómo modelar esta acción ya que estudios previos se han limitado a modelar la cocción en una cara. El giro de la carne se reprodujo considerando dos sartenes en cada cara de la carne. Primero, la cara inferior de la carne se calienta en una sartén. Y tras el giro, la cara superior del mismo trozo de carne se calienta mediante una segunda sartén. Como consecuencia de ello las condiciones de contorno en las superficies superior e inferior se invirtieron después de dar la vuelta.

Debido a la simetría en dos de los ejes de la carne, el modelo recrea solo una cuarta parte de la carne. El mallado se realizó con elementos hexaédricos para la carne, y con elementos tetraédricos para la sartén hasta un total de 366 elementos.

El modelado de la cocción por contacto de una superficie caliente ha sido poco desarrollado si se compara con otros métodos de cocción como el horneado y la fritura. Una posible causa de ello es la complejidad adicional del fenómeno de transferencia de calor entre la superficie de la sartén y la carne. La superficie de contacto real entre sartén y carne es menor que la aparente, de hecho, algunos autores lo han considerado como puntos de contacto intercalados entre las dos superficies (Rocca-Polimeni et al., 2019). En este estudio para regular el flujo de calor que recibe la carne a través de la superficie de calentamiento, se introdujo en el modelo un parámetro que es la conductancia térmica. El valor de este parámetro, $120 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, se obtuvo computacionalmente ya que su determinación experimental es muy compleja.

4.1.6.2 Parámetros de entrada del modelo determinados experimentalmente

Los cambios del módulo de almacenamiento, G' , y el módulo de pérdida, G'' , en función de la temperatura de la carne para las tres condiciones de almacenamiento (fresco, refrigeración y congelación) se muestran en la Figura IV- 20. En el intervalo de temperatura comprendido entre 25 y 55 °C ambos módulos disminuyen para alcanzar un mínimo de 1,9 a 2,4 kPa para el módulo de pérdida y de 11,8 a 13,8 kPa para el módulo de almacenamiento. Sin embargo, en el intervalo de temperatura comprendido entre los 60 y los 80 °C, G' y G'' aumentan bruscamente con la temperatura de la carne, alcanzando un máximo de 4,8 a 5,4 kPa para G'' y de 40,5 a 46,5 kPa para G' . A partir de 80 °C se produce una disminución de ambos módulos. El ángulo de fase, que es la relación entre el módulo de pérdida y el módulo de almacenamiento, disminuye en todo el intervalo de temperatura probado, pero se observa una disminución más acusada de 50 °C a 60 °C y a partir de esta temperatura su descenso es muy suave. El estudio de Tornberg (2005) y el de Rabeler y Feyissa (2018a) recoge la misma tendencia en el módulo de almacenamiento para temperaturas entre 30 a 80 °C en *M. biceps femoris* de vacuno y pechuga de pollo respectivamente. Sin embargo, los valores encontrados por estos autores difieren de los que se muestran en la Figura IV- 20 porque corresponden a diferentes músculos y especies. La disminución de la dureza entre 50-65 °C (que en este estudio se ha reflejado en el grado de cocción 2, Figura IV- 14) conlleva una disminución en el esfuerzo de fractura en la dirección transversal pero no en el longitudinal (Tornberg, 2005). Puesto que el módulo elástico registra ambas deformaciones se aprecia tan sólo una ligera disminución entre 50 y 55 °C (Figura IV- 20).

Como se puede apreciar en la Figura IV- 20 los valores difieren muy ligeramente entre condiciones de conservación. Para todas las temperaturas los módulos de pérdida y almacenamiento fueron inferiores para la carne conservada en fresco. A partir de 55 °C, la carne conservada en congelación mostró un módulo de pérdida y de almacenamiento superiores a los de otras condiciones de conservación.

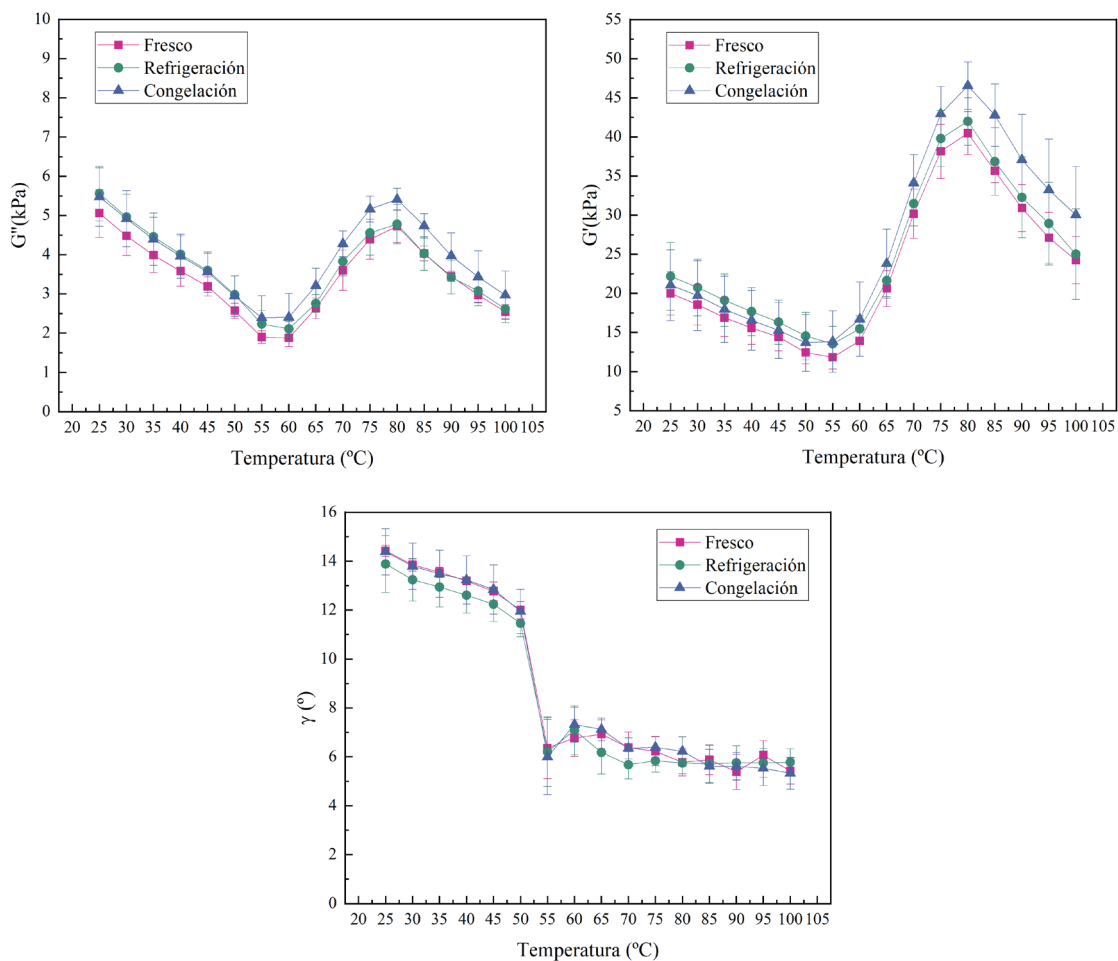


Figura IV- 20. Evolución con la temperatura del módulo de pérdida, G'' , (gráfica superior izqda), el módulo de almacenamiento, G' , (gráfica superior dcha) y el ángulo de fase, γ (gráfica inferior), para lomo de ternera conservado en diferentes condiciones (fresco, refrigeración y congelación).

La variación de la capacidad de retención de agua, CRA, con la temperatura fue otro de los parámetros que se determinó experimentalmente para poder incorporarlo al modelo como límite en el equilibrio del contenido de agua. La capacidad de retención de agua se consideró como la humedad de la carne tras 30 min de calentamiento en baño termostático, considerándose que a partir de este tiempo la humedad apenas se modifica (Goñi y Salvadori, 2010). En la Figura IV- 21 se muestra el efecto de la temperatura en la capacidad de retención de agua para las tres condiciones de conservación. En todos los casos se produce una disminución muy acusada de la capacidad de retención de agua en el intervalo de temperatura comprendido entre 40 a 80 °C. Esto es debido a que a medida que aumenta la temperatura se produce la desnaturalización térmica de las proteínas durante la cocción que es la causante de la reducción de la capacidad de retención de agua

en la carne. A partir de 90 °C la capacidad de retención de agua se estabiliza permaneciendo constante a partir de ese momento. La evolución de la capacidad de retención de agua varía con la temperatura de forma sigmoideal, de la misma forma que describieron previamente Goñi y Salvadori (2010) y Van der Sman (2007). Los valores obtenidos para la capacidad de retención de agua son similares a los encontrados por estos autores para la carne de vacuno, aunque los valores pueden variar de un tipo de músculo a otro (Kondjoyan et al., 2013). La capacidad de retención de agua parece que depende muy poco de la dirección de las fibras de la carne (Oillie et al., 2011), pero se sabe que la longitud del sarcómero tiene una gran influencia en la capacidad de retención de agua. Los mecanismos que están detrás del acortamiento del sarcómero son complejos y continúan discutiéndose (Ertbjerg y Puolanne, 2017).

La carne fresca, inicialmente, es la que mayor capacidad de retención de agua presenta y la carne congelada es la que tiene valores menores posiblemente debido a la ruptura del tejido muscular que suele acompañar a este proceso (Dang et al., 2021; Wang et al., 2020). Sin embargo, a medida que aumenta la temperatura las diferencias se acortan y para temperaturas superiores a 70 °C apenas hay diferencias entre las distintas condiciones de conservación. Estos resultados no concuerdan con los obtenidos para la capacidad de retención de agua determinada por compresión de la carne ya que según estas determinaciones la carne mantenida en refrigeración era la que presentaba una menor capacidad de retención de agua (Tabla IV- 6). Esto pone en evidencia la necesidad de comparar resultados obtenidos utilizando métodos experimentales similares. Las técnicas utilizadas para la determinación de capacidad de retención de agua son bastante simples, pero también pueden producir datos muy variables, que pueden ser extremadamente difíciles de comparar entre múltiples estudios (Oswell et al., 2021). Por ejemplo, Fidalgo et al. (2020) y Choi et al. (2017) no incluyen en su expresión de la capacidad de retención de agua las pérdidas debidas al goteo y a la cocción. La consideración de que la pérdida por goteo y la pérdida por cocción no son indicativos de la capacidad de la carne para retener agua es contraria a la mayoría de los estudios que citan métodos para su determinación. Estas discrepancias que se encuentran en la literatura hacen que la CRA sea extremadamente difícil, de comparar ya que no tiene por qué manifestarse de igual forma si se cuantifica cuando se aplica una presión mecánica sobre la carne que cuando se somete a un calentamiento.

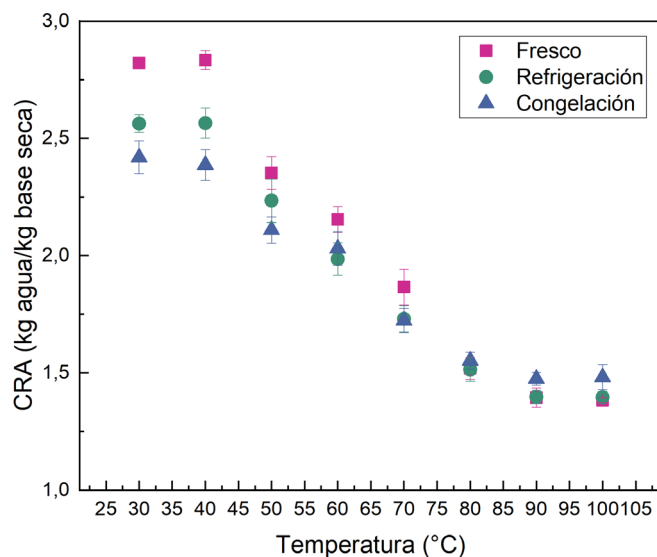


Figura IV- 21. Capacidad de retención de agua (CRA) en función de la temperatura para lomo de ternera conservado en diferentes condiciones (fresco, refrigeración y congelación).

La cinética de cambio de color de la carne obtenida experimentalmente, y descrita para las coordenadas L^* y a^* mediante dos reacciones sucesivas de primer orden (ec 4.4 y 4.5), se quería incorporar al modelo para poder simular los cambios en el color en el interior de la carne. Sin embargo, los parámetros cinéticos obtenidos (Tabla IV- 1 y Tabla IV- 2) no mostraron una tendencia clara con la temperatura, ya que las constantes cinéticas no seguían una dependencia tipo Arrhenius, que permitiera obtener una función continua que se implementase fácilmente en el modelo de elementos finitos. En consecuencia, se propuso otra alternativa para describir la evolución de las coordenadas de color L^* y a^* con la temperatura y con el tiempo. Los resultados experimentales se ajustaron a una función de superficie de respuesta tal y como se muestra en la Figura IV- 22.

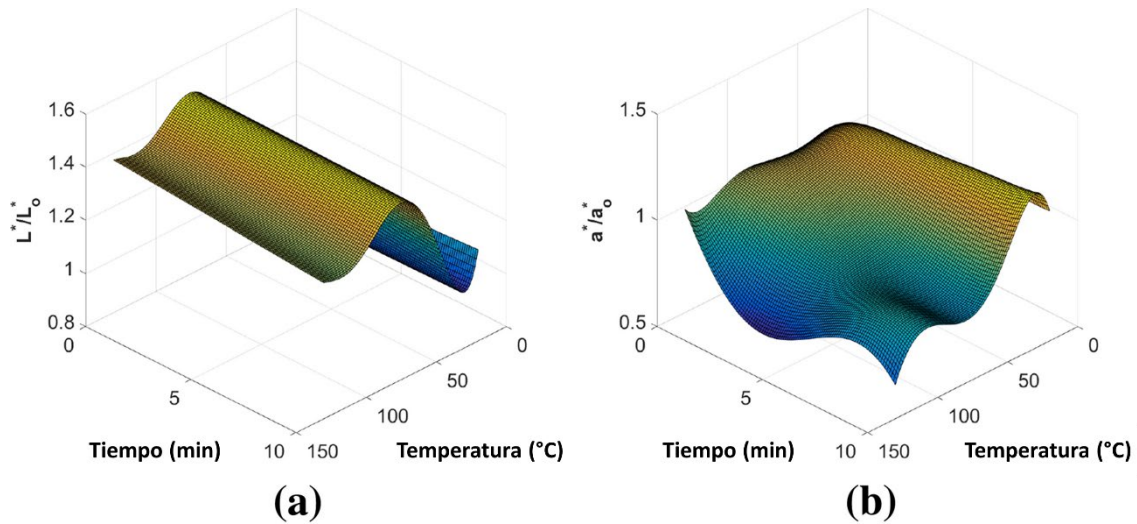


Figura IV- 22. Superficie de respuesta para la evolución térmica de las coordenadas de color L^*/L^*_0 (a) y a^*/a^*_0 (b).

La ec. (4.7) que representa la superficie de respuesta de la coordenada L^* es una función polinómica de quinto grado para la temperatura $T(^{\circ}\text{C})$ y lineal para el tiempo t (min), con un coeficiente de determinación de 0,9661. Los coeficientes de la ec. (4. 7) se muestran en la Tabla IV- 10.

$$\frac{L^*}{L^*_0} = L_{00} + L_{10} \cdot T + L_{01} \cdot t + L_{20} \cdot T^2 + L_{11} \cdot T \cdot t + L_{30} \cdot T^3 + L_{21} \cdot T^2 \cdot t + L_{40} \cdot T^4 + L_{31} \cdot T^3 \cdot t + L_{50} \cdot T^5 + L_{41} \cdot T^4 \cdot t \quad \text{ec. (4.7)}$$

Tabla IV- 10. Coeficientes de la función de superficie de respuesta para la coordenada L^* (ec. 4.7).

L_{00}	1,451	L_{10}	0,06499	L_{01}	-0.01141
L_{20}	-0,315	L_{11}	-0,00843	L_{30}	0.06247
L_{21}	-0,009398	L_{40}	0,08047	L_{31}	-0.006208
L_{50}	-0,02618	L_{41}	0,004121		

En el caso de la coordenada a^* , la superficie de respuesta corresponde con una función polinomial de quinto grado tanto para la temperatura $T (^{\circ}\text{C})$ como para el tiempo t (min).

$$\frac{a^*}{a^*_0} = a_{00} + a_{10} \cdot T + a_{01} \cdot t + a_{20} \cdot T^2 + a_{11} \cdot T \cdot t + a_{02} \cdot t^2 + a_{30} \cdot T^3 + a_{21} \cdot T^2 \cdot t + a_{12} \cdot T \cdot t^2 + a_{03} \cdot t^3 + a_{40} \cdot T^4 + a_{31} \cdot T^3 \cdot t + a_{22} \cdot T^2 \cdot t^2 + a_{13} \cdot T \cdot t^3 + a_{04} \cdot t^4 + a_{50} \cdot T^5 + a_{41} \cdot T^4 \cdot t + a_{32} \cdot T^3 \cdot t^2 + a_{23} \cdot T^2 \cdot t^3 + a_{14} \cdot T \cdot t^4 + a_{05} \cdot t^5 \quad \text{ec. (4.8)}$$

En cuanto a la bondad del ajuste se obtuvo un coeficiente de determinación de 0,9184. Los coeficientes de la ec. 4.8 se muestran en la Tabla IV- 11:

Tabla IV- 11. Coeficientes de la función de superficie de respuesta para la coordenada a^* (ec. 4.8).

a_{00}	0,9453	a_{10}	- 0,1039	a_{01}	- 0,1819
a_{20}	0,06826	a_{11}	- 0,001362	a_{02}	0,03775
a_{30}	- 0,05929	a_{21}	0,1845	a_{12}	0,07191
a_{03}	0,03524	a_{40}	- 0,03432	a_{31}	0,01048
a_{22}	0,03851	a_{13}	- 0,04799	a_{04}	- 0,05117
a_{50}	0,01798	a_{41}	- 0,03213	a_{32}	- 0,00261
a_{23}	-0,04949	a_{14}	- 0,005256	a_{05}	0,02642

4.1.6.3 Validación del modelo

Los resultados computacionales se verificaron comparando la temperatura y la evolución de la pérdida de peso de la carne de lomo de ternera con los resultados obtenidos experimentalmente. Esta comparativa se realizó para diferentes grados de cocción y distintos espesores de la carne.

En la Figura IV- 23 se compara la temperatura en el punto central obtenida con el modelo y los resultados experimentales para tres grados de cocción (Grado 1, Grado 2 y Grado 4) y para un grosor de 1,9 cm. En la medida experimental de la temperatura, el termopar puede sufrir variaciones en su posición, lo que origina desviaciones en la medida de la temperatura. Estas desviaciones se muestran en la figura como bandas grises y corresponden con la desviación estándar de estas medidas. La precisión en la posición del termopar se estimó en ± 1 mm. Por esta razón, se calculó con el modelo cuánto cambiaba la temperatura considerando este desplazamiento en la ubicación de la sonda (ver Figura IV- 23 d). El error cuadrático medio, RMSE, para cada caso se calculó como la raíz cuadrada de la suma de las diferencias al cuadrado entre los valores predichos y los experimentales dividida por el número de datos. Los RMSE obtenidos fueron: 2,16 °C para el Grado 1, 3,56 °C para el Grado 2 y 4,57 °C para el Grado 4, lo que verifica la idoneidad del modelo para la predicción de la evolución de la temperatura central de la carne durante su cocinado. La Figura IV- 23d muestra la distribución de temperatura en una sección longitudinal para el Grado 2. La temperatura de la cara en contacto con la sartén sube rápidamente y se estabiliza después de unos segundos en unos 120 °C. Después de darle la vuelta a la carne a 2/3 del tiempo total de cocinado, se observa una

reducción de esta temperatura ya que esta cara ya no está en contacto con la fuente de calor. Ahora es la cara opuesta la que sufre un aumento de temperatura.

En cuanto a la contracción, la Figura IV- 23d muestra la reducción del volumen de la carne y su cambio de forma para el Grado 2. Al principio, la mayor deformación aparece cerca de la sartén, mientras que en la parte central de la carne apenas hay deformación por ser la zona más fría. A medida que avanza el tiempo, esta deformación se extiende a la parte central. En el momento de dar la vuelta, la máxima deformación se produce de nuevo en la cara en contacto con la sartén. Estos resultados concuerdan con el comportamiento de la carne durante el cocinado como se muestra en la Figura IV- 24 donde se aprecia las zonas que se contraen antes y después del giro. A los 40 s la reducción de volumen es del 1% mientras que al final de la cocción (300 s) es del 9%. En el caso del Grado 4 (420 s), la retracción es del 12%. La evolución de la retracción durante la cocción es consecuencia de una rigidez creciente de la estructura miofibrilar debido a la desnaturalización térmica de las proteínas. En el intervalo de temperatura entre 40 y 60 °C se produce la contracción transversal de las miofibrillas atribuida principalmente a la miosina, y en el intervalo de temperatura de 70 a 80 °C se produce la contracción longitudinal atribuida principalmente a la actina (Hughes et al., 2014; Purslow et al., 2016)

El jugo expulsado por la desnaturalización y contracción de la proteína está asociado con la pérdida de agua durante la cocción que ocurre desde los 45 °C hasta los 75 °C - 80 °C, y por encima de los 80 °C las pérdidas por cocción disminuyen gradualmente (Tornberg, 2005). En la Figura IV- 25 se muestra la evolución de la pérdida de peso de la carne para los diferentes grados de cocción. Los resultados computacionales se ajustan de manera óptima a la experimentación, demostrando un comportamiento lineal en el tiempo. Los RMSE para cada caso fueron: 1,48 % para el Grado 1, 2,08 % para el Grado 2 y 2,40 % para el Grado 4. El trabajo de Dhall y Datta (2011) se obtuvo una pérdida de agua del 7 % en hamburguesas cocinadas durante 300 s, valor éste muy similar al obtenido en nuestro caso para el Grado 2. No es de extrañar que se obtengan resultados similares entre la carne picada y la carne entera, ya que existe evidencia del papel menor del colágeno en la pérdida de agua durante la cocción (Hughes et al., 2014; Tornberg, 2005).

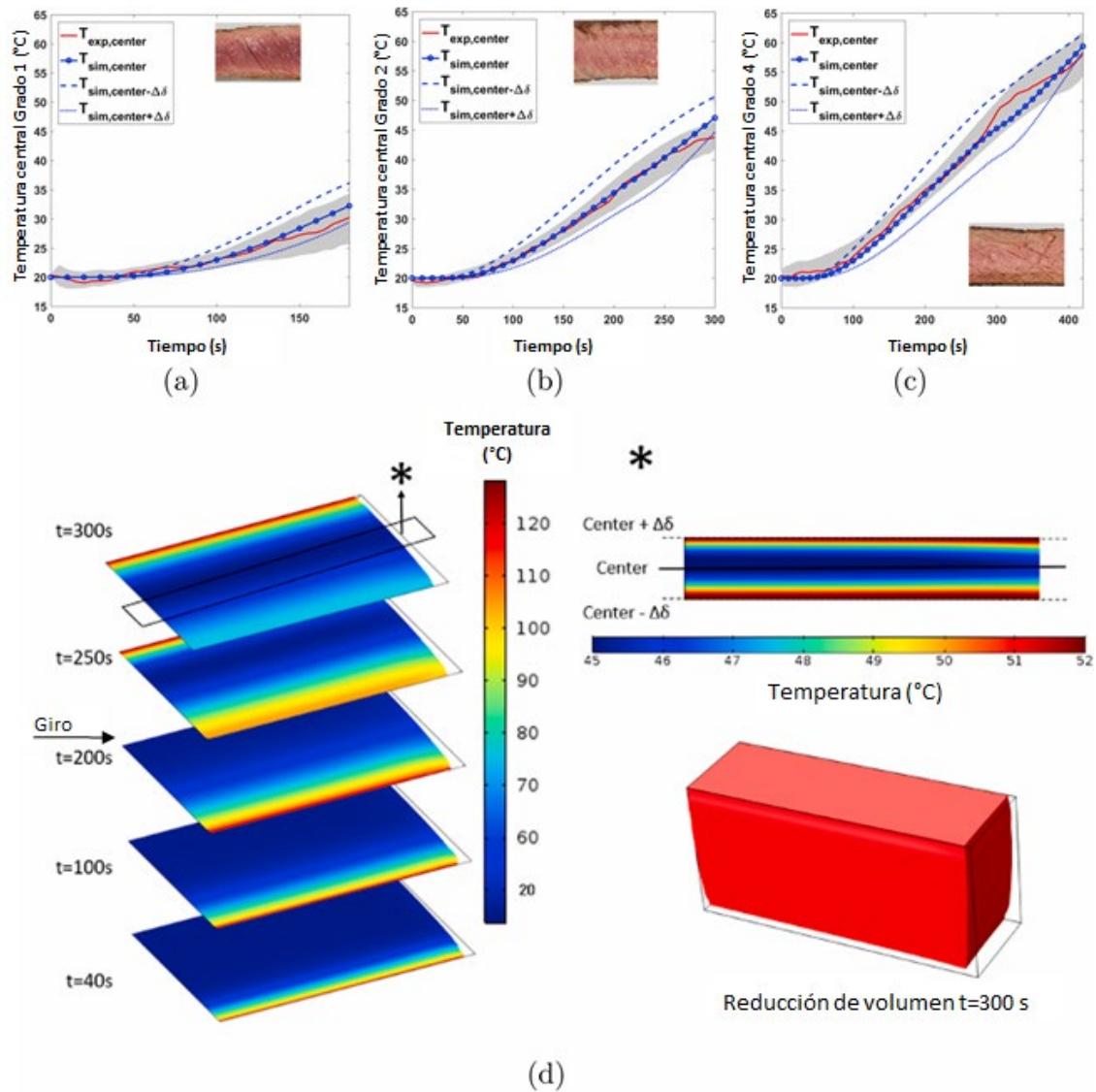


Figura IV- 23. Evolución de la temperatura central para trozos de lomo de ternera de 1,9 cm de grosor: a) Grado 1, b) Grado 2, c) Grado 4. d) Distribución de temperatura en una sección I para diferentes tiempos para el Grado 2, gradiente de temperatura de la sección central considerando el sensor ubicado en $\Delta\delta = \pm 1$ mm, y reducción de volumen.



Figura IV- 24. Aspecto de la carne antes del giro (izqda) y después del giro (dcha) para el grado de cocción 4.

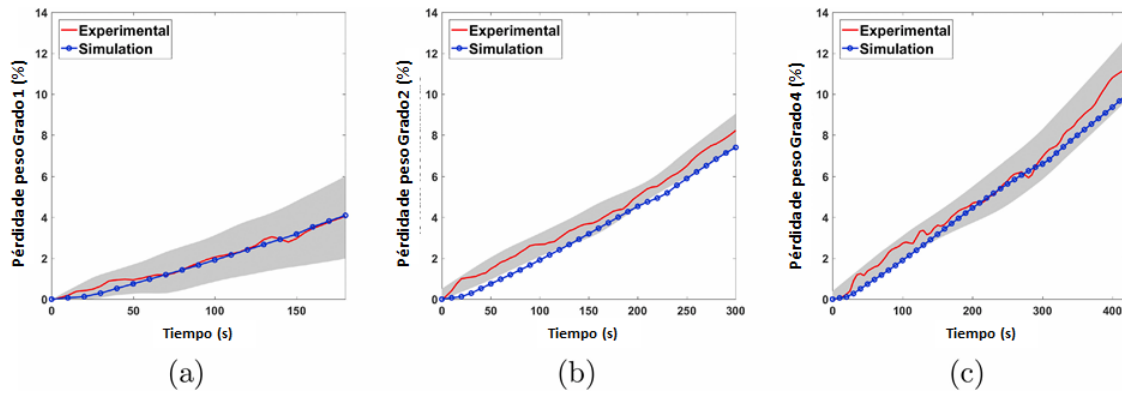


Figura IV- 25. Evolución de pérdida de peso para trozos de lomo de ternera de 1,9 cm de espesor: (a) Grado 1, (b) Grado 2 y (c) Grado 4.

Experimentalmente se había evidenciado que la pérdida de peso era un parámetro adecuado para adaptar los tiempos de cocción a diferentes condiciones de cocinado. Por otra parte, la experimentación había puesto de manifiesto que uno de los parámetros que más influencia tenía sobre la evolución de la temperatura de la carne era el grosor. Todo ello se quiso corroborar con el modelo. Para ello, se estimaron los tiempos de cocción para los grosores de 2,6 y 3,4 cm como aquellos con los que se obtendría la misma pérdida de peso que cuando el grosor era de 1,9 cm. Para 2,6 cm de grosor los tiempos de cocción se modificaron a 225 s para el Grado 1, 450 s para Grado 2 y 720 s para el Grado 4. En el caso de 3,4 cm de grosor estos nuevos tiempos fueron de 265 s para el Grado 1, 495 s para el Grado 2 y 720 s para el Grado 4. La comparativa entre los datos experimentales y los simulados para la temperatura central de la carne y la pérdida de peso se muestran en la Figura IV- 26 para el espesor de 2,6 y en la Figura IV- 27 para el grosor de 3,4 cm. La temperatura máxima alcanzada en el centro de la carne para cada espesor y tiempo era similar a la obtenida para un grosor de 1,9 cm: 2,6 cm (31 °C-Grado 1, 45 °C-Grado 2 y 58 °C-Grado 4) y 3,4 cm (32 °C-Grado 1, 46 °C-Grado 2 y 58 °C-Grado 4).

Esta verificación puede considerarse como una evidencia de que el modelo podría usarse para predecir los tiempos de cocción utilizando como parámetro de referencia la pérdida de peso.

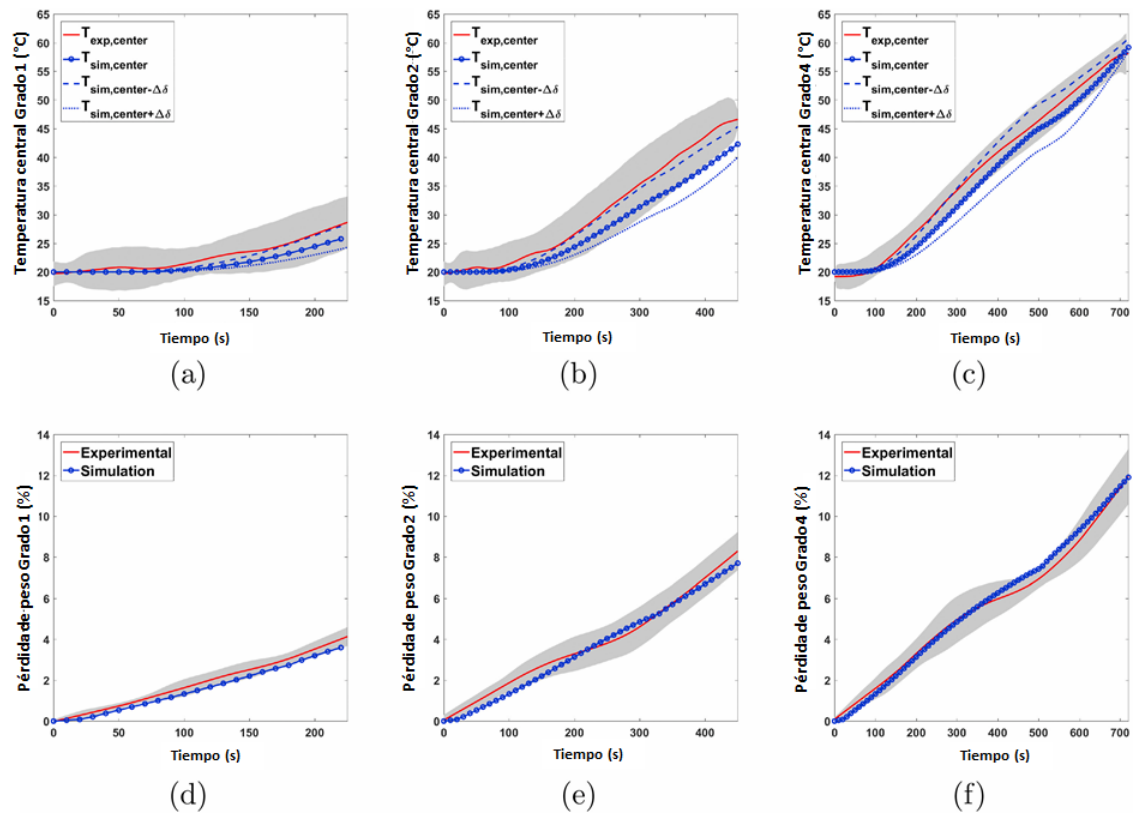


Figura IV- 26. Evolución de la temperatura central en trozos de carne de ternera de 2,6 cm de grosor para diferentes grados de cocción: a) Grado1, b) Grado 2 y c) Grado 4. Evolución de la pérdida de peso: d) Grado1, e) Grado 2 y f) Grado 4.

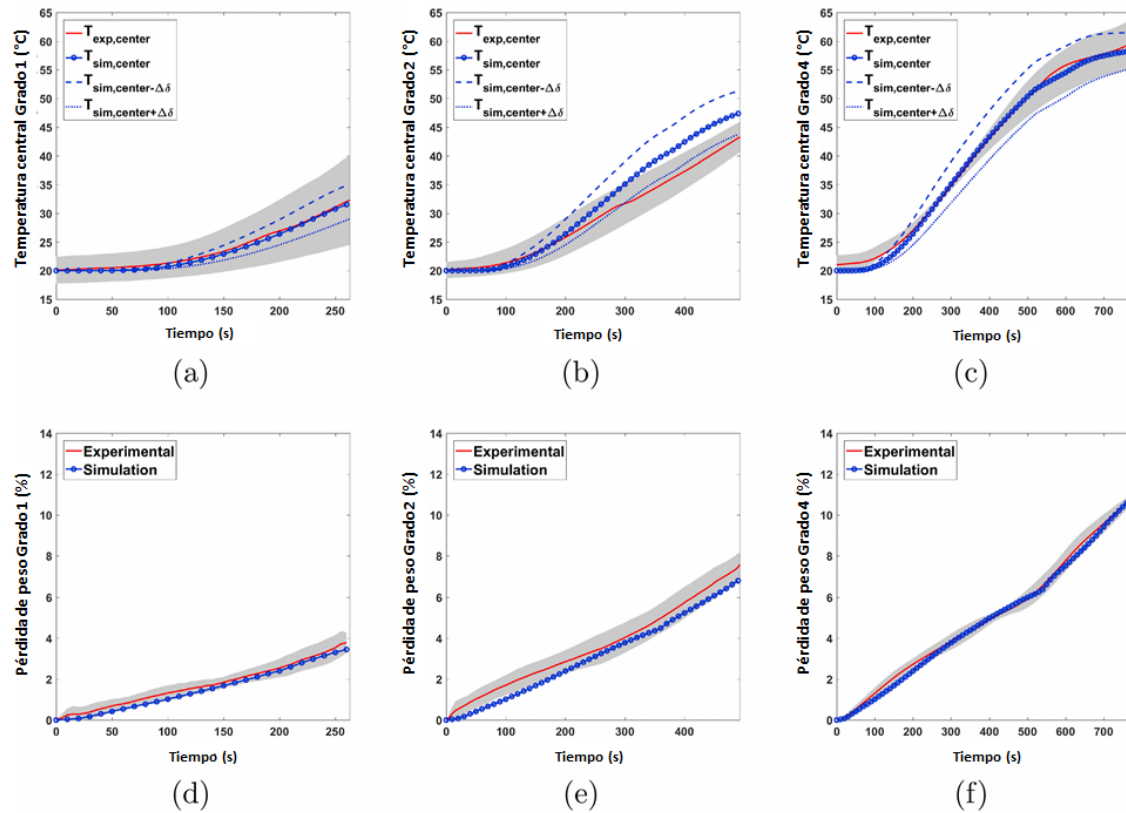


Figura IV- 27. Evolución de la temperatura central en trozos de carne de ternera de 3,4 cm de grosor para diferentes grados de cocción: a) Grado 1, b) Grado 2 y c) Grado 4. Evolución de la pérdida de peso: d) Grado 1, e) Grado 2 y f) Grado 4.

Para corroborar la validez de la cinética de cambio de color (apartado 4.1.2) para predecir la evolución del color en el interior de la carne durante el cocinado se acopló el modelo cinético de cambio de color a la transmisión de calor y a la transferencia de materia. Las coordenadas L^* y a^* obtenidas experimentalmente a diferentes profundidades en la carne al final del proceso de cocinado se compararon con las predichas por el modelo para trozos de carne de 1,9 cm de grosor y diferentes grados de cocción (Figura IV- 28 y Figura IV- 29). Las predicciones concuerdan bien con los datos experimentales teniendo en cuenta que los RMSE para la coordenada L^* fueron 5,17 para el Grado 1, 2,02 para el Grado 2 y 3,83 para el Grado 4; y para la coordenada a^* fueron 1,44 para el Grado 1, 1,26 para el Grado 2 y 0,89 para el Grado 4. La adecuada concordancia de los datos simulados por el modelo con experimentales, que reflejan los valores de los errores cuadráticos medios, permitió verificar el modelo para predecir el color, y validar la cinética de cambio de color.

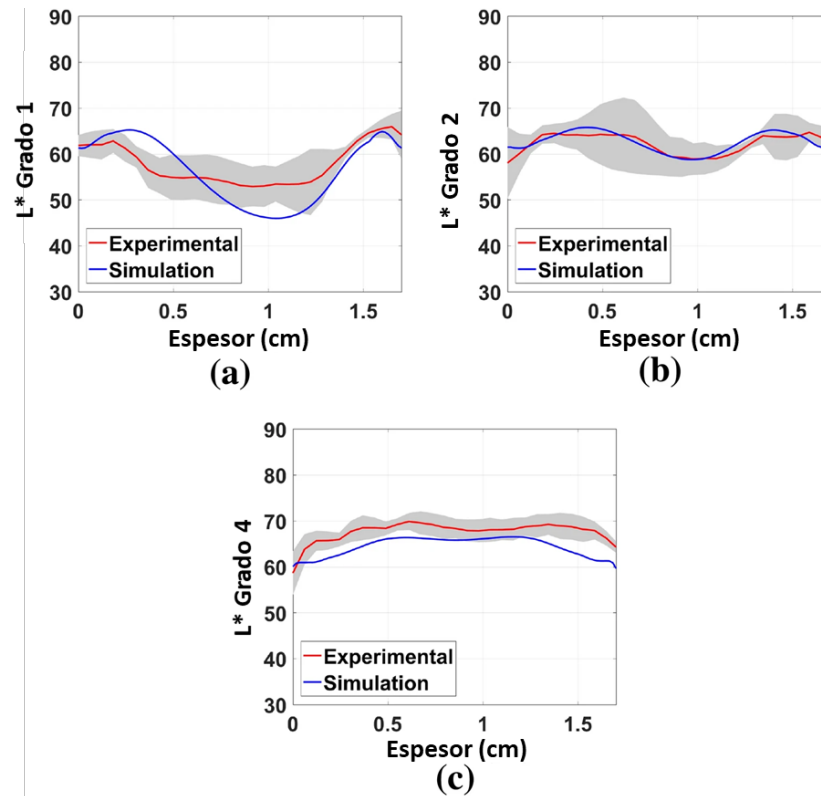


Figura IV- 28. Evolución de la coordenada L^* con el espesor en trozos de carne de lomo de ternera de 1,9 cm de grosor para diferentes grados de cocción: a) Grado 1, b) Grado 2 y c) Grado 4.

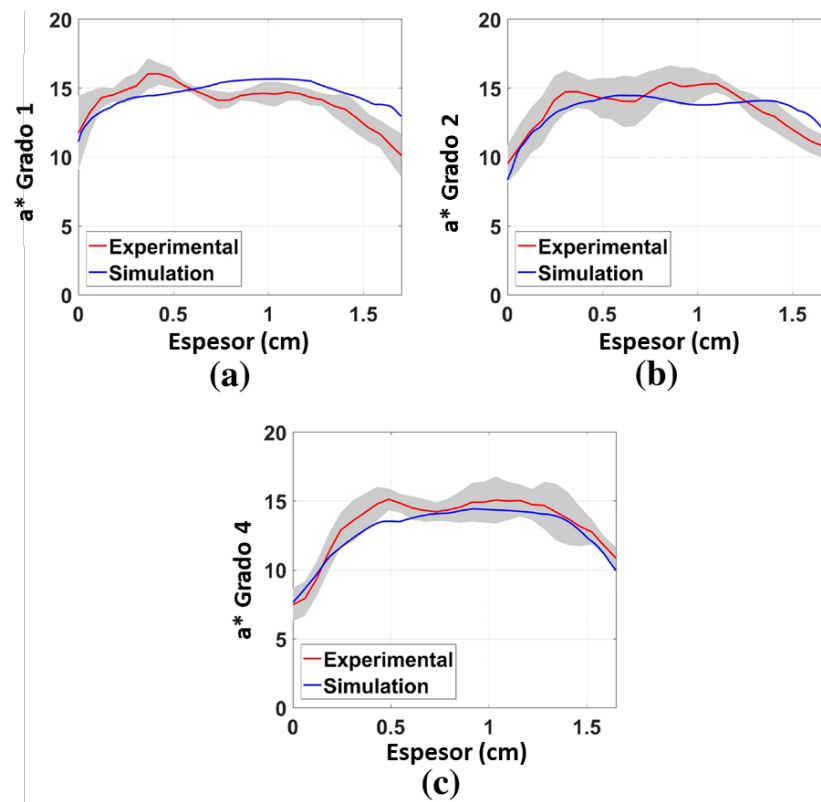


Figura IV- 29. Evolución de la coordenada a^* con el espesor en trozos de carne de lomo de ternera de 1,9 cm de grosor para diferentes grados de cocción: a) Grado 1, b) Grado 2 y c) Grado 4.

4.1.6.4 Utilidad del modelo para la asistencia al cocinado

Experimentalmente se había observado que el perfil de color no era simétrico. Cuando se daba la vuelta a la carne transcurridos $2/3$ del tiempo final, en puntos situados a igual distancia de la superficie, el color desarrollado no era igual para puntos situados en la mitad superior que para los ubicados en la mitad inferior (apartado 4.1.3.1, Figura IV- 9). Esto indica que ambas caras no han tenido un tratamiento térmico equivalente para que el color cambiase de forma similar.

Mediante el modelo, se predijo la evolución del color de la carne con el tiempo; se pudo simular el color a lo largo de la línea transversal central para diferentes tiempos de cocción y tiempos de giro. Mediante el software ColorMine se convirtieron las coordenadas L^* y a^* , obtenidas con la simulación, a coordenadas RGB, considerando la coordenada b^* constante con un valor igual al de la carne cruda. De esta forma se recreaba el color de la carne para diferentes instantes y tiempos de giro tal y como podemos ver en la Figura IV- 30 a modo de ejemplo para los grados de cocción 1 y 4 cuando la carne se daba la vuelta transcurridos $1/2$, $2/3$ y $4/5$ del tiempo final de cocción. En la recreación se puede distinguir una zona cercana a la superficie en la que aparecen tonos cada vez más parduzcos con el tiempo y también una zona central con una luminosidad que aumenta con el tiempo, en total concordancia con lo que se apreciaba experimentalmente (Figura IV- 9).

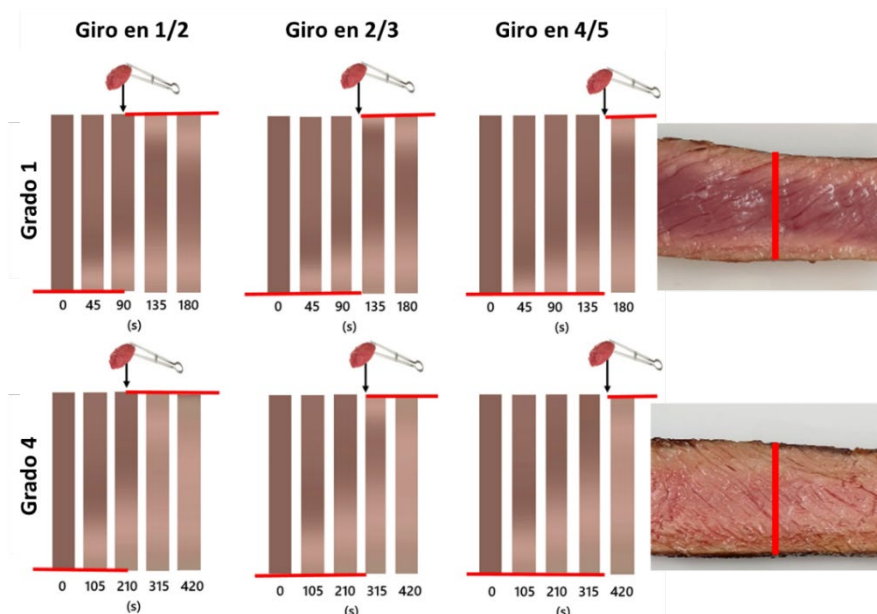


Figura IV- 30. Recreación, para dos grados de cocción, de los cambios de color en el interior de la carne durante el cocinado cuando se da la vuelta a $1/2$, $2/3$ y $4/5$ del tiempo final de cocción.

Como consecuencia de estos cambios de color de la carne durante el proceso de cocción, el color absoluto (ΔE^*) en la zona central de la carne al final del proceso de cocción, es mínimo, para grados de cocción muy suaves, y máximo, para los grados de cocción más intensos. En la Figura IV- 31 se muestra la evolución del color absoluto con el espesor al final de la cocción para diferentes tiempos de giro y grados de cocción. Para el Grado 1, el color absoluto en el centro de la carne apenas ha cambiado con respecto a la carne cruda ($\Delta E^* \approx 2$), mientras que a medida que nos acercamos a ambos extremos, el color absoluto aumenta, alcanzando un valor máximo, y luego disminuye bruscamente en la zona más externa de la carne. Para los Grados 2 y 4, la evolución con el espesor del color absoluto es similar, pero el color absoluto en el centro de la carne está entre 7 y 15 para Grado 2 y alrededor de 21 para Grado 4.

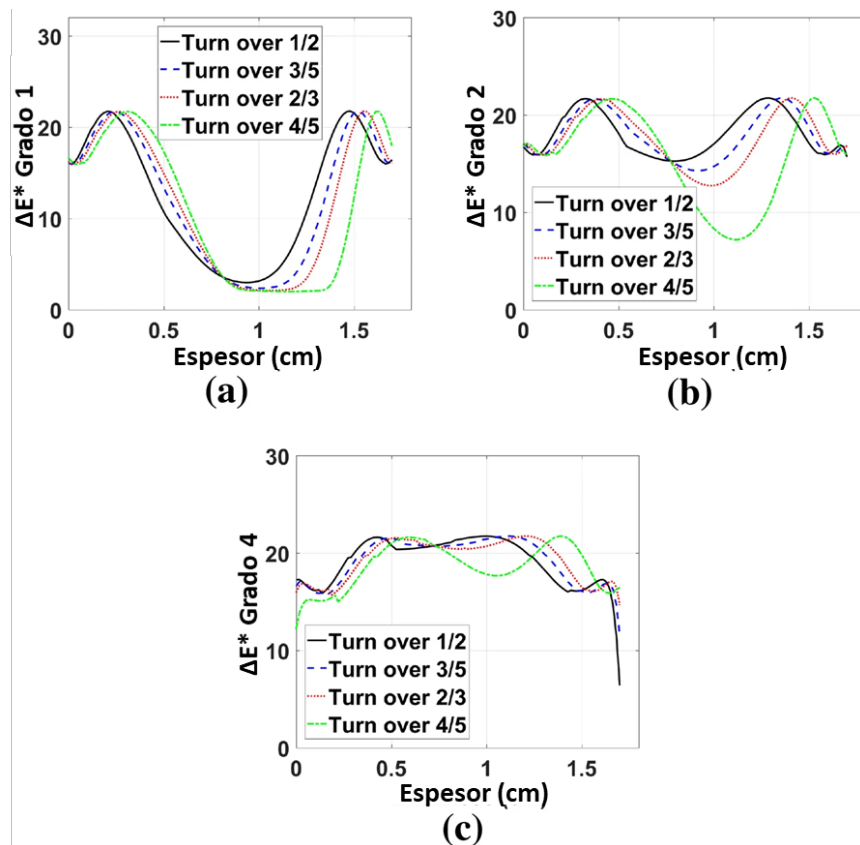


Figura IV- 31. Evolución del color absoluto, ΔE^* , con el espesor al final de la cocción para diferentes tiempos de giro y grados de cocción: a) Grado 1, b) Grado 2 y c) Grado 4.

En todos los casos, los puntos en el interior de la carne en los que el color absoluto comienza a disminuir dependen del tiempo de giro y son los que nos indican la separación entre las dos zonas que se observan en la carne: una central con coordenada L^* y a^* mayores que las de la carne cruda, y otra zona estrecha próxima a la superficie en la que

la carne a perdido su característica tonalidad roja. En vista de estos resultados, se recreó la apariencia de la carne al final del proceso de cocinado para distintos tiempos de giro. Esto se realizó para diferentes grados de cocción tal y como se muestra en la Figura IV-32. Las posiciones en las que el color absoluto comienza a disminuir (obtenidas con las simulaciones del modelo) se indican con una línea azul y también se señala la distancia de esos puntos al borde de la carne. Como se puede observar, para tiempos de cocción cortos (Grado 1), se logra un producto con una cocción similar por ambos lados cuando se da la vuelta a la mitad del tiempo total de cocción. Para los grados de cocción Grado 2 y Grado 4, la simetría en el color se logra cuando el tiempo de giro es tres quintos y dos tercios del tiempo total de cocción, respectivamente.

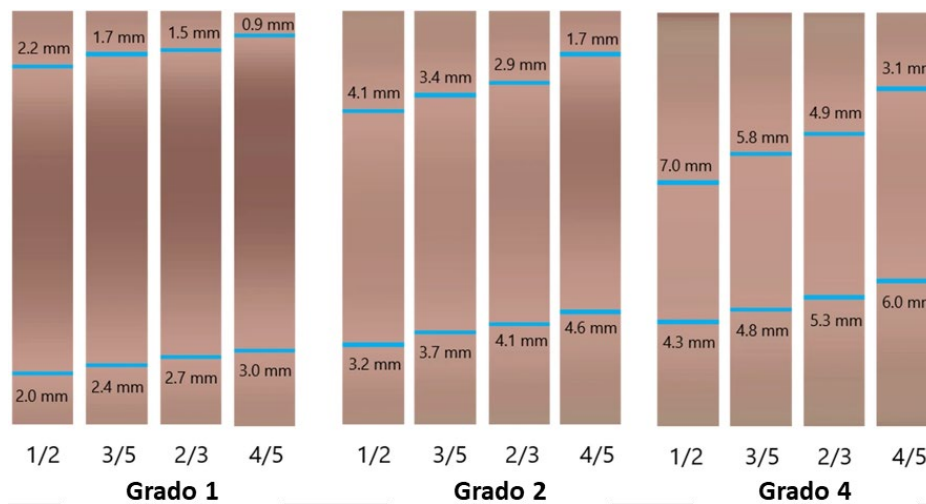


Figura IV- 32. Recreación del color final en el interior de la carne para diferentes grados de cocción y distintos tiempos de giro (1/2, 3/5, 2/3 y 4/5 del tiempo final de cocción). Las líneas azules indican las posiciones en las que el color absoluto comienza a disminuir. La zona inferior de la figura corresponde con el lado de la carne que ha estado primero en contacto con la sartén.

La aplicabilidad del modelo para fines prácticos de cocción se ha ilustrado mediante el cálculo del tiempo de giro para que la carne se cocine uniformemente por ambos lados, concluyéndose que, dependiendo del grado de cocción deseado, el tiempo de giro para lograr este objetivo cambia.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE PANQUEQUES POR CONTACTO CON UNA SUPERFICIE CALIENTE

4.2.1 Cinética de cambio de color del panqueque

El color característico del panqueque es el resultado de las reacciones de pardeamiento no enzimático. El seguimiento del color de la superficie durante el cocinado es importante para identificar el momento en que el producto alcanza el color definido como óptimo por los consumidores (Ureta et al., 2014). En numerosas ocasiones, la formación del color en distintos tipos de alimentos (carne, pan o galletas), cocinados utilizando diferentes técnicas de cocción, se ha modelado en base a la teoría de la cinética química obteniéndose una buena concordancia entre el color medido experimentalmente y el color predicho por el modelo (Broyart et al., 1998; Purlis y Salvadori, 2009). El modelado cinético establece que un proceso puede describirse matemáticamente mediante constantes de velocidad y energías de activación (es decir, parámetros cinéticos) con el objetivo de comprender, predecir y controlar los cambios de calidad en el procesamiento de alimentos (Van Boekel, 2008). Además, las reacciones de Maillard y de caramelización son muy difíciles de controlar debido a que muchos factores influyen en ellas, de manera que el enfoque cinético supone una visión complementaria de los mecanismos de reacción ya que considera únicamente los pasos que son determinantes para la velocidad de la reacción y que por lo tanto pueden utilizarse como puntos de control (Martins et al., 2000). De esta forma, la formación del color se suele simplificar asumiendo un mecanismo general de pardeamiento que incluye tanto la reacción de Maillard como la caramelización (Purlis, 2010).

Para obtener la cinética de cambio de color de los panqueques durante el cocinado, y así poder predecir el color a partir de la temperatura de la sartén, es necesario obtener la evolución del color de los panqueques a diferentes temperaturas. Para ello se realizaron experimentos de cocción controlada utilizando una placa calefactora con la que se obtenía una temperatura homogénea en la superficie de la sartén (± 3 °C). Los panqueques obtenidos tras diferentes tiempos y temperaturas de cocción se escanearon y a partir del análisis digital de estas imágenes se obtuvieron las coordenadas de color CIELab. En la Figura IV- 33 se muestran las imágenes obtenidas para la temperatura de 160 °C a modo

de ejemplo. En la figura se puede observar la evolución del color con el tiempo de cocción, desde un tono amarillo claro, propio de la masa cruda, hacia tonos tostados y dorados característicos de los subproductos de la reacción de Maillard.

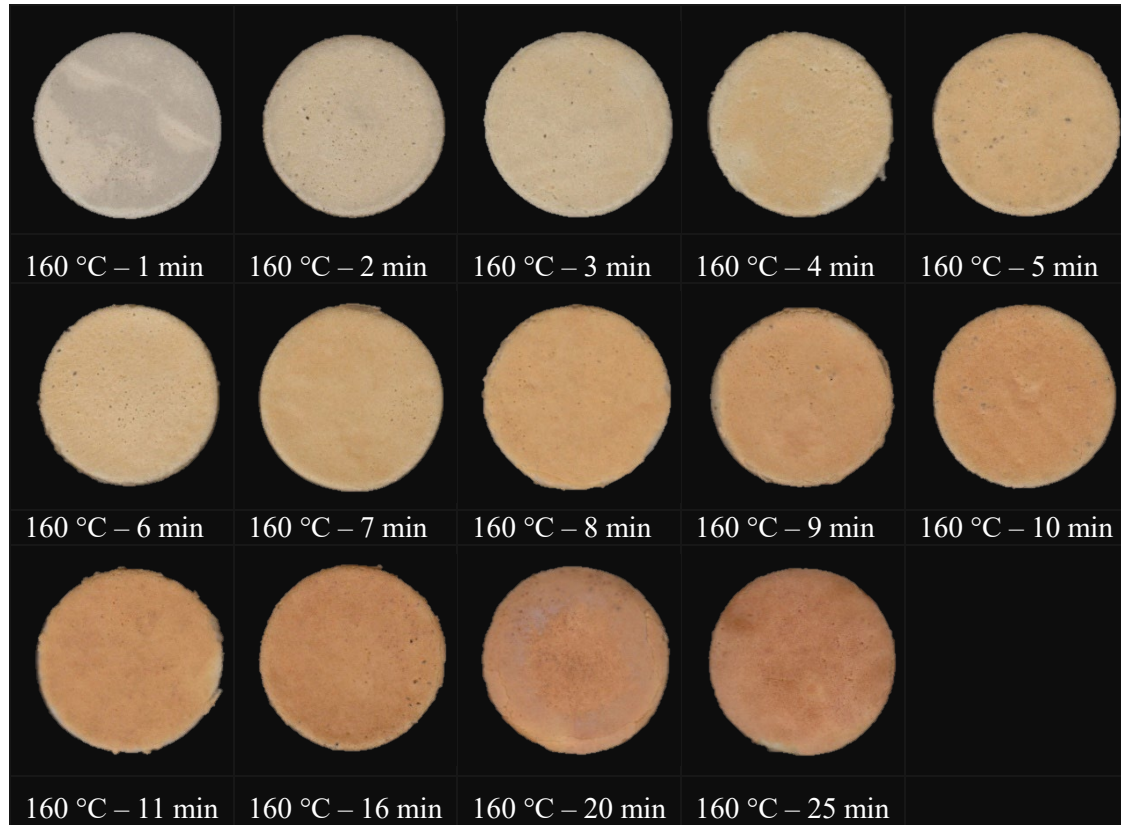


Figura IV- 33. Imágenes digitalizadas de los panqueques durante el cocinado a 160 °C.

En la Figura IV- 34 se muestran los resultados obtenidos de la evolución de la coordenada de color L^* durante el cocinado de los panqueques a diferentes temperaturas.

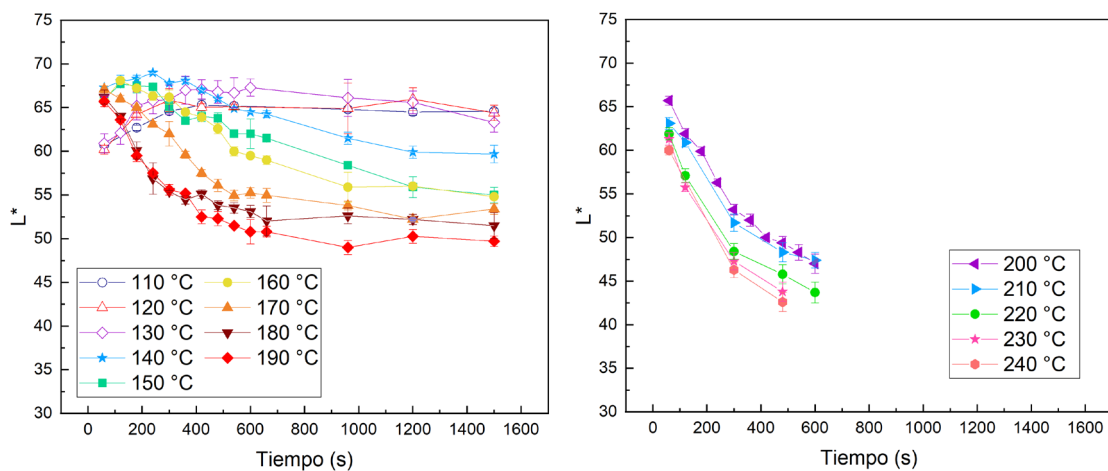


Figura IV- 34. Evolución de la coordenada L^* durante la cocción de panqueques para temperaturas de 110 a 190 °C (izquierda) y de 200 a 240 °C (derecha).

A temperaturas inferiores a 140 °C el valor de L^* experimenta un leve aumento al inicio de la cocción y a partir de los 5 o 6 minutos se estabiliza en torno a 65. Los requisitos mínimos para el inicio de los cambios de color se producen a una temperatura superior a 120 °C (Purlis y Salvadori, 2009) pero los cambios que experimentan los panqueques a temperaturas inferiores de 140 °C son pequeños comparados con los que sufren a partir de esa temperatura, ya que a bajas temperaturas la reacción de Maillard se produce a una velocidad tan lenta que apenas se manifiesta en cambios de color. A temperaturas superiores a 140 °C, se observan cambios más importantes en el color y un comportamiento diferente. A 140, 150 y 160 °C, se pueden distinguir dos etapas en la variación de la luminosidad, al principio la luminosidad aumenta y alcanza su valor máximo en los 4 primeros minutos de cocción y posteriormente disminuye gradualmente, hasta 60 en el caso de 140 °C y hasta 55 para 150 y 160 °C. Shibukawa et al. (1989) atribuyen este comportamiento al secado de la superficie, mientras que Broyart et al. (1998) lo achacan, además, al cambio inicial de volumen. Purlis y Salvadori (2009) también distinguió dos etapas en la variación de la luminosidad durante el horneado de pan a 180 y 200 °C, y atribuyó este fenómeno a los cambios físicos que ocurren en la superficie del producto, ya que inicialmente las muestras están más rugosas y tras los primeros minutos de cocción la muestra se vuelve lisa debido al aumento de volumen. Una superficie lisa tiene una mayor capacidad para reflejar de luz que una rugosa aumentando el valor L^* en los primeros minutos. Sin embargo, a partir de 170 °C, no se observan dos etapas, sino que el valor de L^* disminuye conforme avanza la cocción, sin observarse el aumento inicial, posiblemente porque la evolución es más rápida y tiene lugar durante los 60 s iniciales. En el trabajo de Purlis y Salvadori (2009), a temperaturas más altas de 220 °C, tampoco se observa el aumento en la luminosidad de la superficie del pan durante los primeros minutos de cocción. La cocción a estas altas temperaturas, se caracteriza por el rápido oscurecimiento de la superficie debido a reacciones de Maillard siguiendo una cinética que algunos autores han descrito como de primer orden (Ibarz et al., 2000). En algunos trabajos además han encontrado una buena correlación entre este descenso de la luminosidad durante el cocinado de masas con la formación de hidroximetilfurfural (HMF) (Ameur et al., 2006), y es que la formación de HMF es un indicador del calentamiento de alimentos que contienen carbohidratos (Purlis y Salvadori, 2007). Al final de la cocción la luminosidad tendría una tendencia asintótica hacia un valor correspondiente al de una muestra quemada (Zanoni et al., 1995).

En la Figura IV- 35 se recogen los resultados obtenidos de la evolución de la coordenada de color a^* durante el cocinado de los panqueques a diferentes temperaturas.

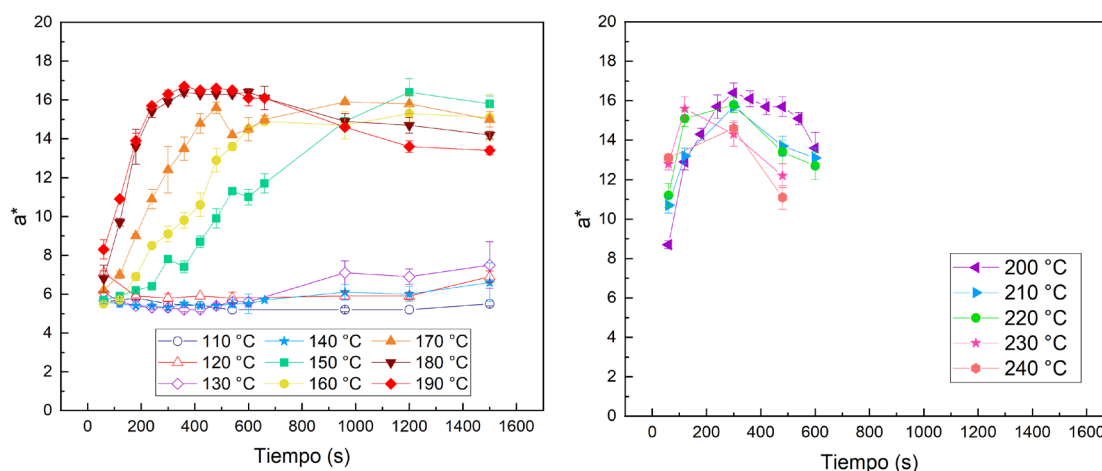


Figura IV- 35. Evolución de la coordenada a^* durante la cocción de panqueques para temperaturas de 110 a 190 °C (izquierda) y de 200 a 240 °C (derecha).

La coordenada a^* a temperaturas menores de 140 °C prácticamente no cambia, manteniéndose en valores próximos al valor inicial (en torno a 6). A partir de 150 °C la coordenada a^* aumenta hasta un valor máximo de aproximadamente 16, y después de alcanzar dicho valor se produce una disminución al prolongarse la cocción durante más tiempo, como si los compuestos intermedios de la reacción de Maillard estuviesen asociados a tonos marrones-rojizos. Este comportamiento se produce más rápidamente cuanto mayor es la temperatura. Para 180 y 190 °C, a los 5 min prácticamente ya se han producido todos los cambios en la coordenada a^* , alcanzando el valor máximo para luego producirse el descenso hasta valores de aproximadamente 14. En la Figura IV- 35 (derecha) se muestran los resultados experimentales de la coordenada a^* a temperaturas mayores de 200 °C. A estas altas temperaturas se produce el mismo comportamiento, pero a mayor velocidad. Este patrón concuerda con los resultados obtenidos por otros autores. En el trabajo de Silva et al. (2022) en el que estudian la cinética del color de pan horneado, se obtienen valores con un comportamiento similar, con una ligera disminución de la intensidad del color rojo (coordenada a^*), después de 27 min a 220 °C. En el trabajo de Gökmen y Şenyuva (2006) sobre los cambios de color de la harina de trigo, también se describe a 220 °C un aumento rápido de la coordenada a^* hasta un máximo a los 30 min de cocinado, seguido de una disminución exponencial. Sin embargo, a temperatura más bajas 150 y 180 °C la coordenada a^* aumentó durante todo el calentamiento sin

experimentalmente esa disminución final. Estos mismos autores también observaron el mismo comportamiento en patatas fritas. La coordenada a^* aumentaba rápidamente al inicio del calentamiento, alcanzando a los 3-4 min un máximo, y posteriormente disminuía exponencialmente para las temperaturas más altas (190 y 210 °C), pero para 150 y 170 °C no observaron esta disminución posterior de la coordenada a^* . En vista de la evolución de la coordenada a^* , Gökmen y Şenyuva (2006) sugieren que los cambios de color se deben a los productos intermedios formados durante la reacción de Maillard. Además, encontraron el mismo patrón en la formación de acrilamida por lo que consideran que la coordenada a^* puede ser un indicador fiable de los niveles de acrilamida en los alimentos procesados térmicamente.

En la Figura IV- 36 se recogen los resultados obtenidos de la evolución de la coordenada b^* durante el cocinado de los panqueques a diferentes temperaturas.

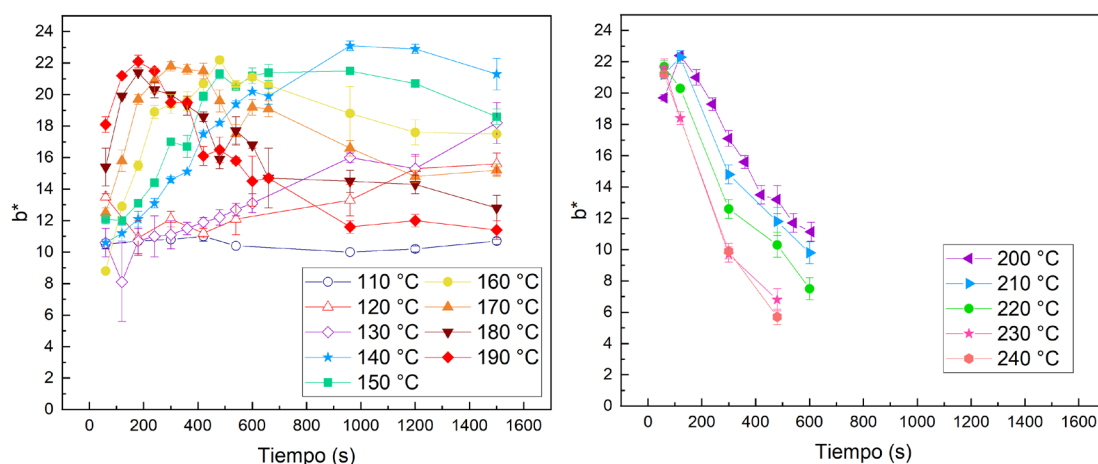


Figura IV- 36. Evolución de la coordenada b^* durante la cocción de panqueques para temperaturas de 110 a 190 °C (izquierda) y de 200 a 240 °C (derecha)

Los datos obtenidos en la coordenada b^* muestran que a 110 °C no se producen apenas cambios en esta coordenada, y aunque a partir de 120 °C comienza a observarse alguna modificación, no aparece una evolución sostenida hasta los 140 °C. A partir de esa temperatura, se alcanza un valor máximo cercano a 21. Al igual que ocurre en la coordenada a^* , a temperaturas altas y tiempos prolongados, se produce un descenso. La caída en el valor de b^* es especialmente abrupta por encima de 200 °C, ya que los compuestos responsables del cambio de color que han experimentado los panqueques se degradan. En esta etapa, en la que el tiempo de cocción excede al que se utilizaría en el proceso de elaboración, la superficie del panqueque se puede describir como quemada.

Silva et al. (2022) observaron el mismo comportamiento en la evolución del color del pan durante la cocción donde después de 24 min a 200 °C y 15 min a 220 °C, la intensidad del color amarillo disminuye linealmente.

Una vez caracterizado el color de los panqueques, se quiso desarrollar un modelo matemático con el objetivo de poder predecir el desarrollo del pardeamiento durante el cocinado de los panqueques.

La diferencia de color o color absoluto, ΔE^* , puede ser útil para englobar en un único parámetro todos los cambios de color que tienen lugar y por ello en productos de base amilácea se ha utilizado este parámetro para describir los cambios de color que se producen durante la cocción de estos alimentos (Chhanwal et al., 2011; Putranto et al., 2015; Zhang y Datta, 2006; Zhang et al., 2016). Los modelos cinéticos existentes de cambio de color durante la cocción de productos de base amilácea se han planteado en base a la variación tanto de la coordenada L^* (Broyart et al., 1998; Purlis, 2010; Sanz-Serrano et al., 2017) como del color absoluto (Purlis y Salvadori, 2007; Zanon et al., 1995). Por ello, con los datos resultantes de las medidas de color a distintos tiempos durante el cocinado de panqueques a partir de 140°C, se ha planteado un modelo cinético basado en el color absoluto, ΔE^* .

Los valores experimentales obtenidos se ajustaron a un modelo cinético de primer orden, de forma análoga a la que otros autores han realizado para los cambios de color de la corteza de pan (Purlis y Salvadori, 2009; Zanon et al., 1995) y para la evolución de la coordenada L^* en galletas (Broyart et al., 1998). La ecuación a la que se ajustaron los datos experimentales fue:

$$\Delta E^* = \Delta E_{\infty}^* \cdot (1 - e^{-kt}) \quad \text{ec. (4.9)}$$

donde k es la constante cinética de primer orden (s^{-1}) y ΔE_{∞}^* es color absoluto a tiempo infinito puesto que los datos experimentales tienden de forma asintótica a un valor comprendido entre 15,8 y 17,8. El modelo matemático ajusta adecuadamente los datos experimentales asumiendo un ΔE_{∞}^* de 17 para todas las temperaturas con un resultado aceptable.

En la Figura IV- 37 (izquierda) se muestran los datos experimentales del color absoluto y los resultantes del ajuste de los mismos a la ec. (4.9), para las temperaturas

entre 140 °C y 190 °C. En todos los casos se obtuvo una buena concordancia con una R^2 superior a 0,9099. El color absoluto, ΔE^* , muestra con el tiempo de cocción una tendencia ascendente a partir de 140 °C. El aumento del color absoluto es más rápido conforme más alta es la temperatura de cocción, hasta alcanzar asintóticamente un valor máximo. Existe una gran diferencia en el desarrollo del color entre los panqueques elaboradas a 140 y 150 °C y el resto de temperaturas. Para un mismo tiempo de cocción, entre 160 y 190 °C, presentan valores similares siendo el cambio de color máximo de 4 unidades y a los 10 min el color ya se ha desarrollado casi por completo, mientras que a 140 y 150 °C el cambio más acusado en el valor de ΔE^* se produce a partir de ese momento. En la Figura IV- 37 (derecha) se muestran los datos experimentales del color absoluto para temperaturas superiores a 190 °C. Estos datos no se han ajustado a la ec. (4.9) debido a que no siguen la misma tendencia ya que en el intervalo en el que se dispone de datos experimentales no tiende asintóticamente a un valor límite. Por encima de los 200 °C el cambio de color absoluto supera las 17 unidades debido a la fuerte caída de la luminosidad. Cuando el panqueque ya está cocido y se prolonga el tiempo de cocción, se torna muy oscuro y se quema en una etapa de degradación intensa. Esta tendencia es similar a la obtenida por Putranto et al. (2015) ya que observan un cambio de color más rápido a 200 °C, que a 150 °C donde el cambio de color alcanza un valor de 15 que es similar al obtenido en este trabajo. Zhang et al. (2016) concluyeron que el cambio del color absoluto, ΔE^* , de los mini-panes que estudiaron, dependía principalmente de la temperatura de cocción y aumentaba con el tiempo de horneado como era de esperar y como hemos visto en nuestros resultados. Algunos autores consideraron que cuando las muestras de pan presentan valores de ΔE^* entre 50 y 60, se trata de productos inaceptables para el consumo (Ahrne et al., 2007; Zanonni et al., 1995). En nuestro caso este límite corresponde a unos valores de ΔE^* más bajos. Con valores de ΔE^* superiores a 20 el producto tiene una apariencia de “quemado” con un color que no corresponde con el característico para los panqueques.

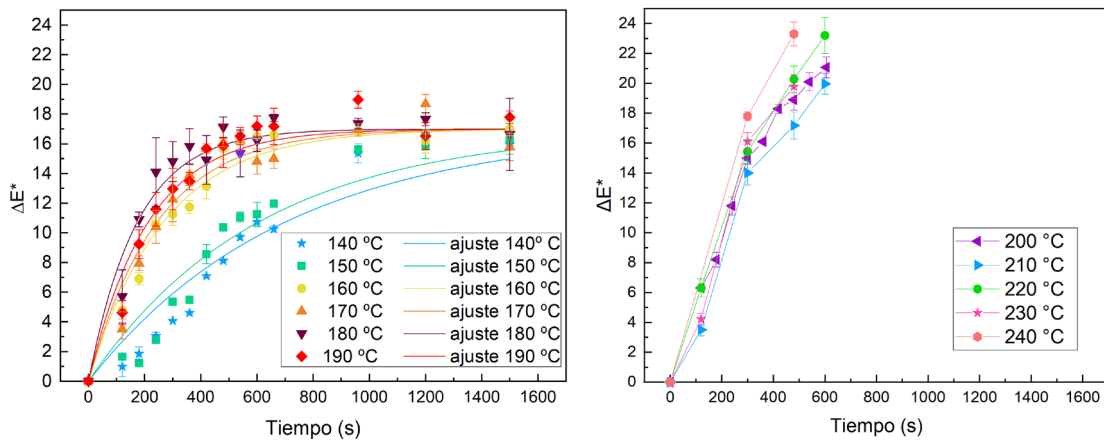


Figura IV- 37. Datos experimentales y predichos según una cinética de primer orden para la evolución del color absoluto.

Se ha considerado una dependencia de la constante cinética del color absoluto con la temperatura tipo Arrhenius:

$$k = k_0 \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad \text{ec. (4.10)}$$

donde k_0 es el factor preexponencial (s^{-1}), E_a es la energía de activación ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$) y R es la constante de los gases ideales ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

En la Figura IV- 38 se representa la evolución el logaritmo neperiano de la constante cinética frente a la inversa de la temperatura y el correspondiente ajuste lineal que implica la ec. (4.10).

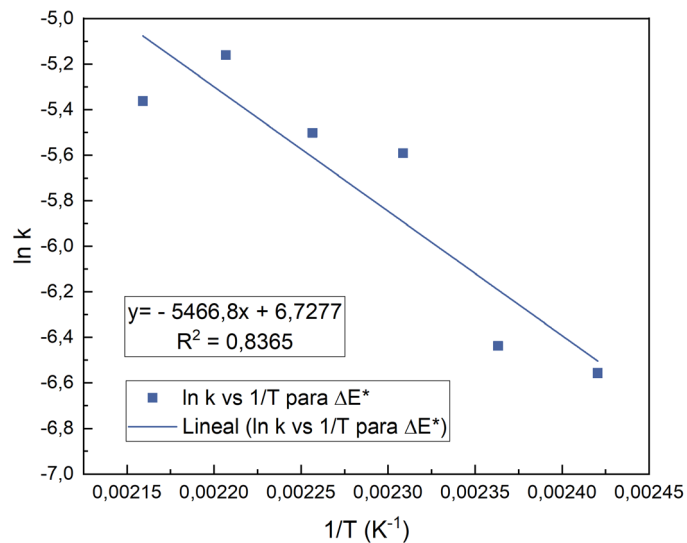


Figura IV- 38. Dependencia de la constante cinética del color absoluto, ΔE^* , con la temperatura de cocción para panqueques.

La correlación entre el logaritmo neperiano de la constante cinética y la inversa de la temperatura sigue la ecuación de Arrhenius, con un coeficiente de determinación de 0,8365, un factor preexponencial, k_0 , de $845,2 \text{ s}^{-1}$ y una energía de activación, E_a , de $45453 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$. La energía de activación obtenida, es sensiblemente inferior a la de otros estudios de cambio de color absoluto durante el tostado de pan (Putranto et al., 2015; Zaroni et al., 1995; Zhang et al., 2016). En estos trabajos las energías de activación tomaban valores en torno a los $60000 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$. Estas diferencias son debidas a que el producto objeto de estudio y las condiciones de cocción (horneado frente a cocción en superficie caliente) son bastante diferentes, por lo no pueden compararse los valores directamente. Sin embargo, sí es reseñable el hecho de que el modelo cinético obtenido sea semejante.

Otros modelos cinéticos de pardeamiento, que se basan en una cinética de primer orden, consideran que el cambio de color es una función de la temperatura y del contenido de agua. Así, Purlis y Salvadori (2007) observaron que la formación del color en la superficie del pan durante el horneado depende de la pérdida de peso y la temperatura del horno, y encontraron una tendencia lineal entre el cambio de color absoluto y la pérdida de peso de los panes. De manera análoga, Broyart et al. (1998) desarrollaron un modelo cinético de primer orden para predecir la variación de la luminosidad de la superficie de las galletas en función de la temperatura y la humedad del producto. Wählby y Skjöldebrand (2002) también encontraron una tendencia lineal entre la pérdida de peso y el oscurecimiento de las muestras de pan. A partir de esta literatura, se consideró interesante analizar la dependencia del color absoluto con la pérdida de humedad durante el cocinado.

Como se puede observar en la Figura IV- 39, la evolución de la humedad durante la cocción sigue la típica curva de secado. Al principio el agua se pierde a velocidad constante hasta que se alcanza un punto crítico en el que la superficie del panqueque deja de estar saturada y entonces la pérdida de humedad se ralentiza cada vez más, aproximándose asintóticamente al valor final.

De forma similar al color absoluto, con los datos de la evolución de la humedad de los panqueques durante el cocinado se ha determinado la cinética de pérdida de agua considerando una reacción de primer orden. La ecuación de ajuste ha sido:

$$H = H_0 + (H_\infty - H_0) \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) \quad \text{ec. (4.11)}$$

donde H_0 es el valor inicial de humedad (66,0 %) y H_∞ el valor al que tiende a tiempo infinito (40,0 %).

En la Figura IV- 39 se muestra junto con los datos experimentales los predichos según la ecuación anterior. Los datos experimentales presentaron un buen ajuste con la ec (4.11) para cada temperatura con un coeficiente de regresión superior a 0,9653.

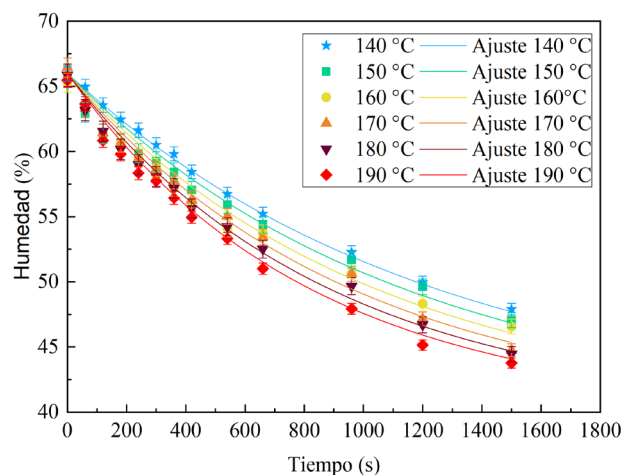


Figura IV- 39. Datos experimentales y ajuste de los mismos a una cinética de primer orden para la evolución de la humedad durante el cocinado de panqueques a diferentes temperaturas.

La constante cinética de pérdida de humedad se ha considerado que varía con la temperatura según una dependencia tipo Arrhenius, ec. (4.10), tal y como se muestra en la Figura IV- 40.

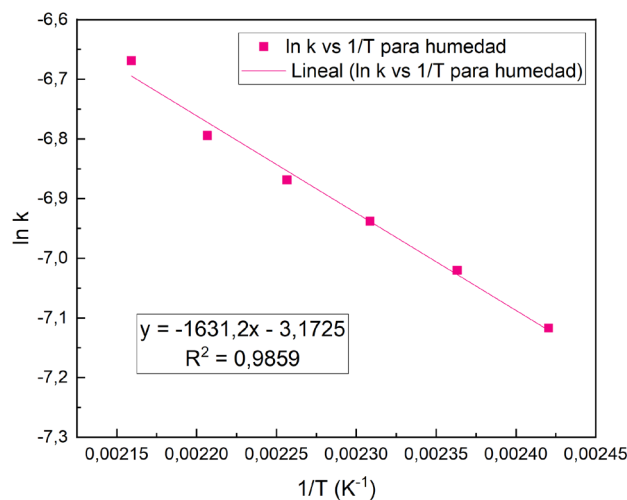


Figura IV- 40. Dependencia de la constante cinética de la humedad con la temperatura de cocción para panqueques.

La correlación entre el logaritmo neperiano de la constante cinética y la inversa de la temperatura sigue la ecuación de Arrhenius, con un coeficiente de determinación de 0,9859. Los valores del factor pre-exponencial, k_0 , y de la energía de activación, E_a , son de $0,0419 \text{ s}^{-1}$ y de $135621 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$, respectivamente.

Purlis y Salvadori (2007) propusieron la siguiente ecuación para relacionar los cambios de color en la corteza del pan con la humedad:

$$\Delta E^* = k \cdot WL \quad \text{ec. (4.12)}$$

donde $k = k_0 T_{\text{horno}} + k_1$, es la tasa de pardeamiento y se asume que es una constante de proporcionalidad dependiente de la temperatura del horno (T_{horno}) y WL es la pérdida de peso.

Del mismo modo, en el caso de los panqueques, se quiso determinar la relación entre el color absoluto y la humedad, por lo que en la Figura IV- 41 se muestra la relación existente entre el cambio de color absoluto y la humedad de los panqueques para diferentes temperaturas.

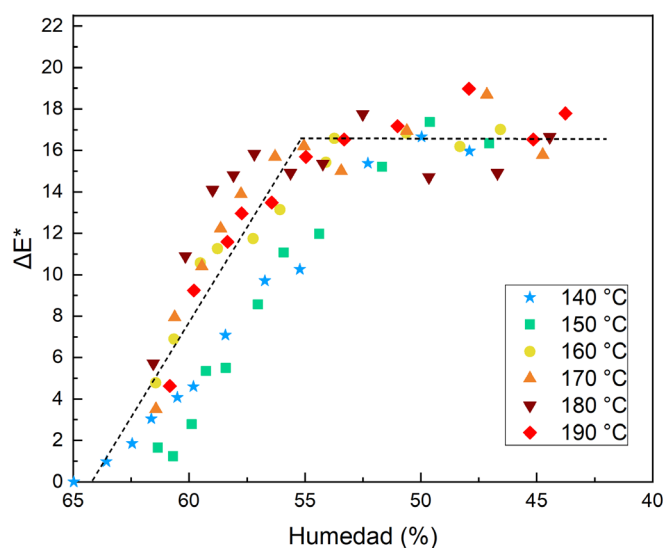


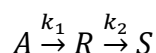
Figura IV- 41. Relación entre el cambio de color absoluto y la humedad de los panqueques.

Para temperaturas mayores de $140 \text{ }^{\circ}\text{C}$, en las que el color de los panqueques llega a desarrollarse, el cambio en el color absoluto se produce cuando la humedad desciende desde el 65 hasta el 52 %. A partir de ese punto, aunque se sigue produciendo una pérdida de agua, ésta no se acompaña de una modificación en el color. Este intervalo de humedades corresponde además con el periodo de secado a velocidad prácticamente

constante. A diferencia de los resultados obtenidos por Wählby y Skjöldebrand (2002) y Purlis y Salvadori (2007), no se puede establecer una relación lineal entre la generación de colores tostados y la pérdida de humedad que sea aplicable a todo el intervalo de humedades, como se observa en la Figura IV- 41., si bien en términos generales se puede decir que hay una relación lineal entre ΔE^* y la humedad en el periodo de secado a velocidad constante.

Por otra parte, no hay ningún estudio que establezca un modelo de pardeamiento utilizando la coordenada de color a^* , salvo un estudio reciente de Silva et al. (2022). Sin embargo, esta coordenada de color se valora en diferentes productos en los que se produce pardeamiento (Mousavinejad et al., 2015; Pedreschi et al., 2006a) y que se considera un indicador válido de los niveles de acrilamida (Gökmen y Şenyuva, 2006). Por ello, también se obtuvo la cinética para la coordenada a^* .

La ecuación cinética utilizada para describir el cambio de la coordenada de color, a^* , corresponde a la de dos reacciones irreversibles en serie de primer orden:



La concentración del producto intermedio, R, que se asocia a la coordenada a^* , se expresa mediante la ecuación:

$$C_R = C_{R0} + C_{A0} \cdot k_1 \left(\left(\frac{e^{-k_1 t}}{k_2 - k_1} \right) + \left(\frac{e^{-k_2 t}}{k_1 - k_2} \right) \right) \quad \text{ec. (4.13)}$$

donde: $C_{R0} = a_0^* = 3,6$ y C_{A0} se relaciona con el máximo valor que puede tener a^* según la expresión:

$$C_{R,max} = C_{R0} + C_{A0} \cdot \left(\frac{k_1}{k_2} \right)^{\frac{k_2}{(k_2 - k_1)}} \quad \text{ec. (4.14)}$$

Según los resultados experimentales a_{max}^* es de 18,6, luego a C_{A0} le corresponde un valor de 19.

En la Figura IV- 42 se muestran los resultados del ajuste de los datos experimentales de la coordenada a^* según la ecuación (4.13) para las temperaturas de 140 °C a 190 °C (izquierda) con una buen coeficiente de correlación superior a 0,9537 y para las temperatura de 200 a 240 °C (derecha) con un coeficiente de correlación superior

a 0,9848. Con la excepción de la temperatura de 140 °C que no tuvo un buen ajuste debido a que la evolución del color es casi inexistente por lo que a esta temperatura no se podría aplicar el ajuste.

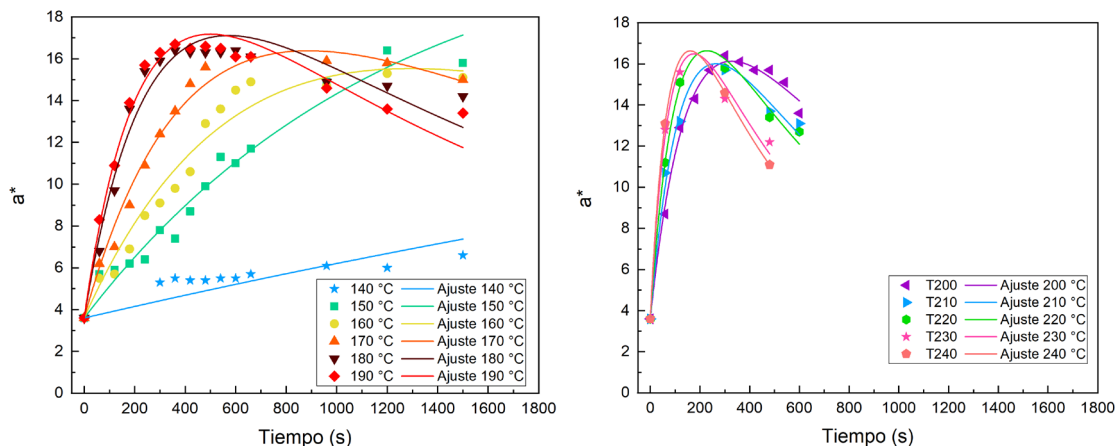


Figura IV- 42. Datos experimentales y ajuste de los mismos a un modelo cinético de la evolución de la coordenada a^* para temperaturas menores de 190 °C (izquierda) y para temperaturas mayores de 200 °C (derecha) para panqueques.

También, se ha considerado una dependencia de las constantes cinéticas con la temperatura tipo Arrhenius para la coordenada a^* . En la Figura IV- 43 se representa la evolución el logaritmo neperiano de las constantes cinéticas k_1 y k_2 frente a la inversa de la temperatura y los correspondientes ajustes lineales para la coordenada a^* .

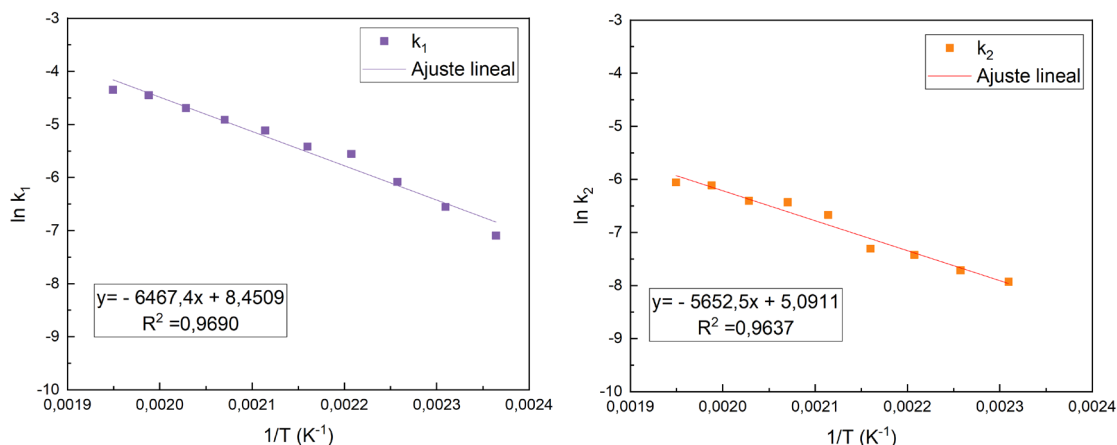


Figura IV- 43. Dependencia de la constante cinética de la coordenada a^* con la temperatura de cocción para panqueques.

En el caso de la coordenada a^* la correlación entre el logaritmo neperiano de la constante cinética y la inversa de la temperatura sigue la ecuación de Arrhenius, con un coeficiente de regresión de 0,9690 para k_1 y 0,9637 para k_2 . Los valores de factor pre-exponencial, k_0 , y de la energía de activación, E_a , para k_1 y k_2 se muestran en la Tabla IV-

12. Los parámetros cinéticos obtenidos para la coordenada a^* , no se ha podido comparar con otros estudios ya que no se ha encontrado ningún trabajo que estudie la cinética para la coordenada a^* , con excepción del trabajo de Silva et al. (2022) en el que estudiaron la evolución del color para todos los parámetros del espacio de color CIELab en pan horneado, pero son productos y medios de cocción diferentes por lo que no es comparable.

Tabla IV- 12. Valores de los parámetros cinéticos que describen una dependencia con la temperatura tipo Arrhenius de las constantes cinéticas que modelan los cambios de la coordenada de color a^* en la cocción de panqueques.

	k_0 (s^{-1})	E_a ($J \cdot mol^{-1}$)	R^2
k1	4679,4	53770	0,9690
k2	162,6	46995	0,9637

4.2.2 Asistencia al cocinado: selección de criterios para dar la vuelta al panqueque

La acción de dar la vuelta debería de realizarse en base a criterios como: que se haya desarrollado el color deseado en la cara contacto con la superficie caliente, que el alimento haya adquirido la consistencia suficiente como para que no pierda la forma, o que el avance del frente térmico sea suficiente para que tras la siguiente etapa se alcance la temperatura deseada en el centro del producto. Toda esta información la puede aportar el modelado del cocinado por contacto con una superficie caliente. Si el usuario pudiera contar con una visión virtual de la realidad física que ocurre en la cara oculta del alimento y del mapa térmico de todo el alimento podría tomar la decisión de dar la vuelta con mejor criterio.

Para establecer el momento más adecuado para dar la vuelta al producto es necesario conocer la evolución con el tiempo de las variables en base a las cuales se fijen los criterios para realizar esta acción. Por lo tanto, es necesario caracterizar la cocción del producto mediante variables que reflejen las transformaciones físico-químicas que tienen lugar durante el cocinado del panqueque.

4.2.2.1 Caracterización del proceso de cocción de los panqueques.

4.2.2.1.1 Evolución de la temperatura de la sartén durante el cocinado

Se determinó la evolución de la temperatura en el centro de la superficie de la sartén durante el cocinado del panqueque y durante el calentamiento de la sartén sin adición de alimento. Estos ensayos se realizaron a tres potencias diferentes y

considerando como tiempo inicial aquel al que se alcanzaban los 230 ± 2 °C. Como se puede comprobar en la Figura IV- 44, tras verter la masa, en los primeros 30 s, la temperatura de la sartén disminuyó 25 °C, 15 °C y 8 °C para las potencias de 647 W, 947 W y 1144 W, respectivamente. En el trabajo de Sanz-Serrano et al. (2017) también se describe esta disminución de temperatura en la superficie de la sartén al añadir la masa. Posteriormente, la temperatura aumentaba aproximándose a la temperatura que presenta la sartén sin panqueque.

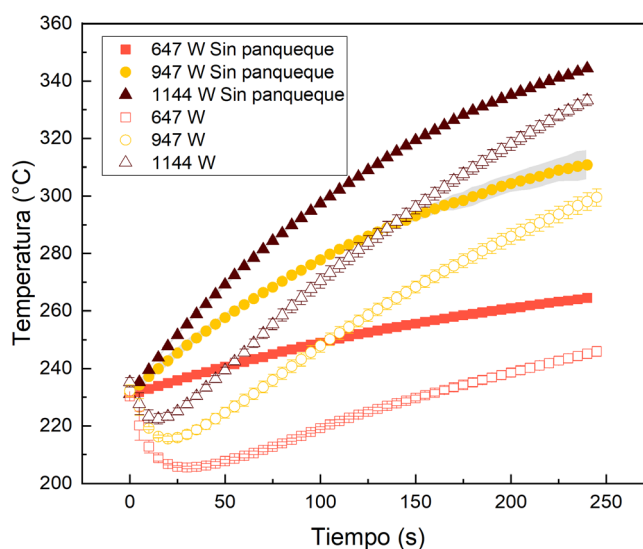


Figura IV- 44. Evolución de la temperatura en el centro de la sartén durante el cocinado del panqueque y sin panqueque.

4.2.2.1.2 Evolución del color de los panqueques

Se determinó la evolución del color de la superficie del panqueque en contacto con la sartén durante su cocinado a tres potencias. Los panqueques se escanearon para obtener imágenes de las que obtener las coordenadas CIELab mediante técnicas de análisis digital de imagen (Figura IV- 45).

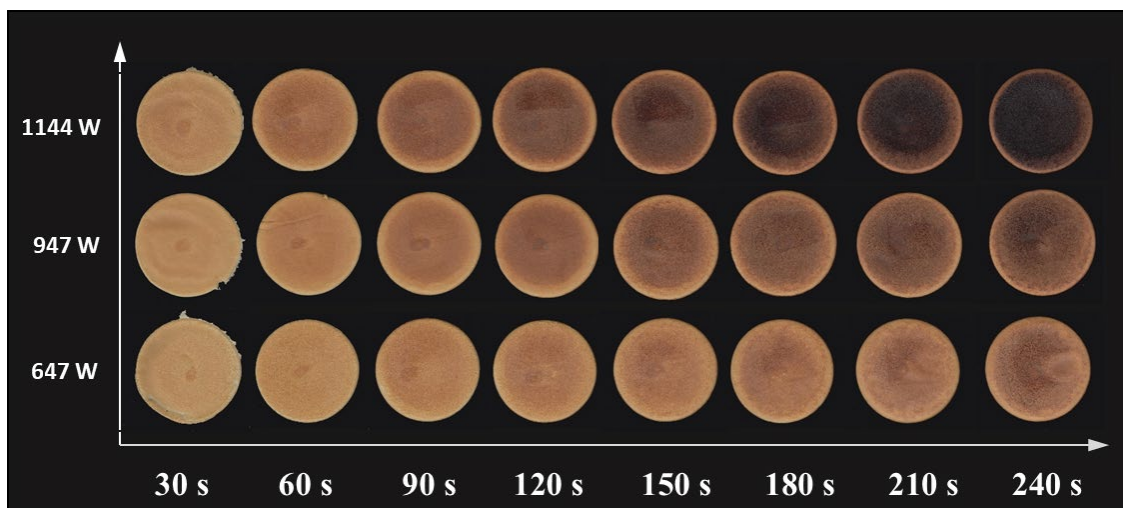


Figura IV- 45. Imágenes tomadas con escáner de los panqueques tras su cocinado a diferentes tiempos y potencias.

En la Figura IV- 46 se muestra la evolución de la coordenada a^* y del color absoluto durante el cocinado para las tres potencias ensayadas. En todos los casos la coordenada a^* aumenta rápidamente en los primeros 30 s. A partir de ese instante continúa incrementándose más lentamente hasta alcanzar un máximo para posteriormente descender. Al aumentar la potencia aumenta el valor máximo que se alcanza, disminuye el tiempo al que la coordenada a^* es máxima y aumenta la velocidad de descenso; de manera que la coordenada a^* al final de la cocción es menor cuanto mayor es la potencia. Este comportamiento es coherente con los resultados de la cinética del color (Figura IV- 42), ya que cuando las temperaturas de cocinado son altas, la coordenada a^* experimenta un máximo para luego disminuir. Sato (2019) también observó esta disminución de la coordenada a^* en pan, coincidiendo con el tiempo al que el pan tenía un aspecto comestible.

También se determinó la evolución del color absoluto (ΔE^*), que indica las diferencias de color que presentaron los panqueques con respecto al del panqueque a tiempo 0. Los valores de $L^*a^*b^*$ para el instante inicial del cocinado se obtuvieron de imágenes de panqueques cocinadas durante 1 s (tiempo suficiente para que la masa en contacto con la sartén cuajase y se pudiera manipular para su escaneo). En los 30 primeros segundos se produce el mayor cambio de color (aproximadamente 15 unidades). A partir de ese momento, el color absoluto sigue aumentando hasta estabilizarse al final de la cocción. Cuanto más elevada es la potencia mayor es la velocidad a la que el color absoluto cambia y por lo tanto mayores son las diferencias en el color con respecto al del

panqueque inicial. Durante el cocinado de los panqueques a la potencia más baja (647 W), a partir de los 120 s no se producen apenas cambios de color, mientras que a potencias más altas esta estabilización se produce a tiempos mayores (180 s).

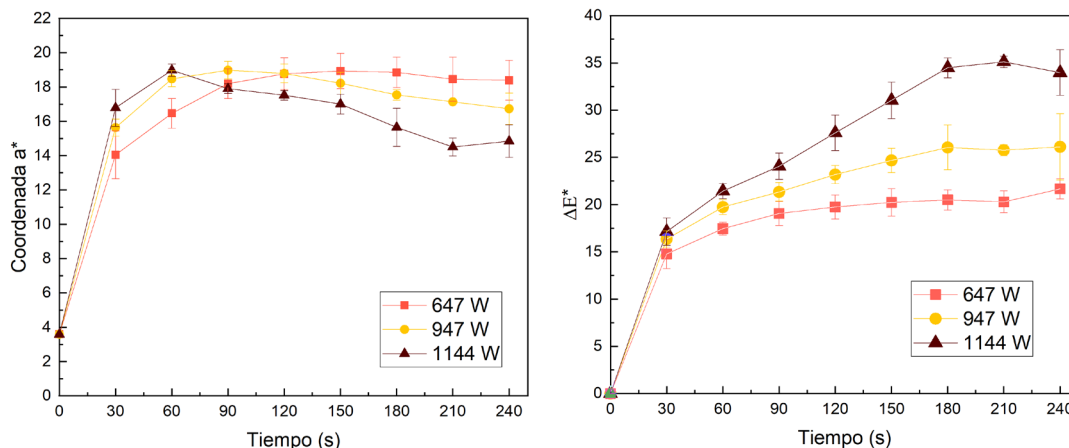


Figura IV- 46. Evolución de la coordenada a^* (izquierda) y color absoluto (ΔE^*) (derecha) durante el cocinado de los panqueques para tres potencias.

En la Figura IV- 47, se muestra la evolución de la coordenada L^* para las tres potencias ensayadas. Al aumentar el tiempo de cocinado disminuye la luminosidad del panqueque, y este descenso sucede a mayor velocidad cuando la potencia es más elevada. Este hecho se debe a que el aumento de temperatura favorece la caramelización de los azúcares y la formación de compuestos que generan tonalidades más oscuras que se suman a los productos de la reacción de Maillard, disminuyendo la luminosidad de los panqueques (Purlis y Salvadori, 2009).

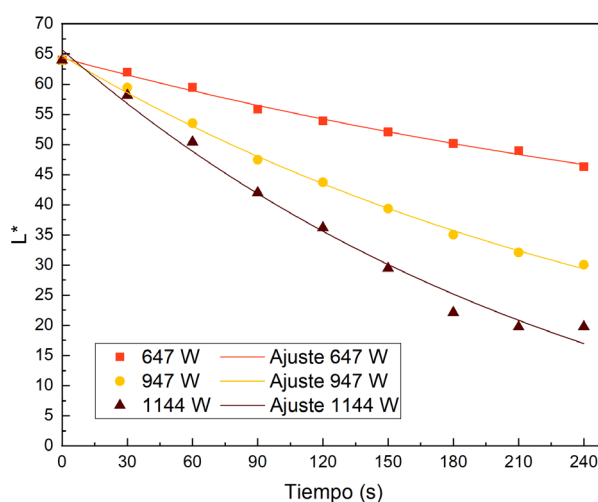


Figura IV- 47. Evolución de la coordenada L^* durante el cocinado del panqueque para tres potencias.

4.2.2.1.3 Evolución de la pérdida de peso

La evolución de la pérdida de peso se determinó mediante la medida en continuo del peso del panqueque que refleja fundamentalmente los cambios en el contenido de agua de la masa durante la cocción. Al ser una variable que puede medirse *online* puede ser un buen indicador del momento adecuado para dar la vuelta al producto. La pérdida de peso durante el horneado de diferentes masas ha sido ampliamente estudiada (Iribes-Salazar et al., 2018; Zhang et al., 2017) a diferencia del cocinado por contacto con una superficie caliente. La temperatura en la sartén alcanza valores elevados, por lo que la cara en contacto con la superficie caliente se seca rápidamente alcanzando un contenido en agua muy bajo. Esto hace que, a diferencia de la cocción en horno, la cocción de panqueques se realiza en pocos minutos (Guibert-Martin et al., 2017). La transferencia de calor queda limitada a la conductancia entre la sartén y el panqueque, que al principio de la cocción tiene valores altos pero que a medida que se forma la costra se reduce al empeorar el contacto entre el panqueque y la sartén. La formación de costras se acompaña en ocasiones de la apertura de fisuras superficiales, lo que favorece la salida del vapor de agua (Huang et al., 2021).

En la Figura IV- 48 se muestran los resultados obtenidos de la evolución de pérdida de peso durante el cocinado de los panqueques a las tres potencias ensayadas. Como cabía esperar, se produjo mayor pérdida de peso cuanto mayor era la potencia ensayada con una relación casi lineal entre la pérdida de peso y el tiempo de cocción a partir del primer minuto. Estos resultados concuerdan con los obtenidos en la cinética de la pérdida de agua porque la cocción se realizó durante 240 s y a ese tiempo la curva de secado todavía se encuentra en el tramo de velocidad de secado constante (Figura IV- 39).

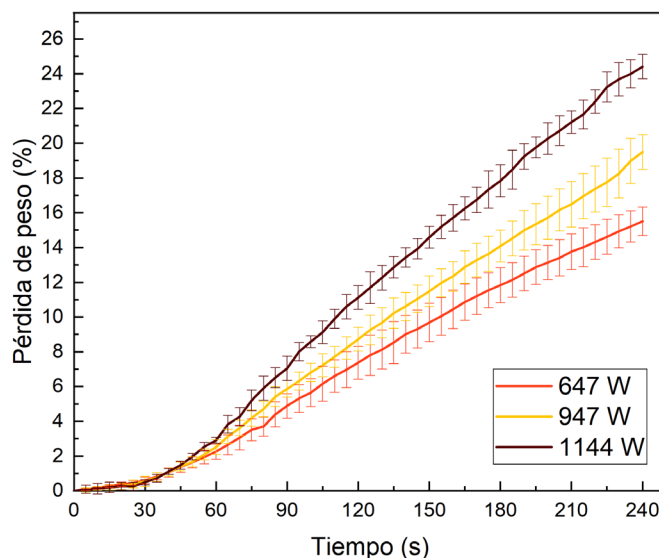


Figura IV- 48. Evolución de la pérdida de peso durante el cocinado del panqueque a diferentes potencias.

4.2.2.1.4 Evolución de la temperatura superficial

Durante el cocinado de la masa de panqueque, los gránulos de almidón absorben gran parte del agua, se hinchan y gelifican, formando la estructura característica, junto con la coagulación de las proteínas del huevo. Esta gelatinización del almidón y coagulación de las proteínas del huevo se producen a partir de una temperatura de 60 °C – 70 °C (Guibert-Martin et al., 2017; Martinez-Cervera et al., 2012). Otra condición para ejecutar la acción de dar la vuelta al panqueque es cuando se hayan producido estas transformaciones para evitar que la masa se derrame durante el volteo. Es por ello que se capturaron imágenes con una cámara termográfica de la cara superior del panqueque a diferentes tiempos de cocinado tal y como se muestra en la Figura IV- 49 para una potencia de 1144 W.

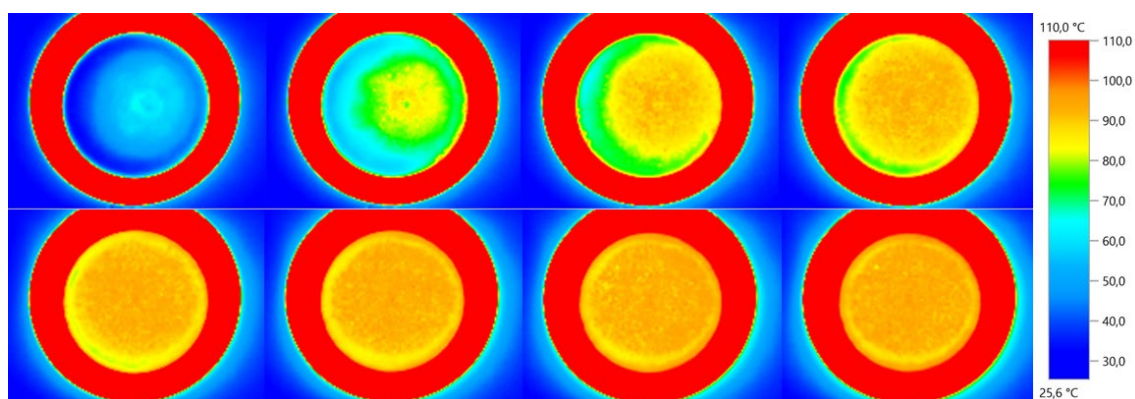


Figura IV- 49. Imágenes termográficas de la cara superior del panqueque durante el cocinado a una potencia de 1144 W.

A partir de estas imágenes se determinó la temperatura superficial media de la cara superior del panqueque, cuya evolución con el tiempo se muestra en la Figura IV-50.

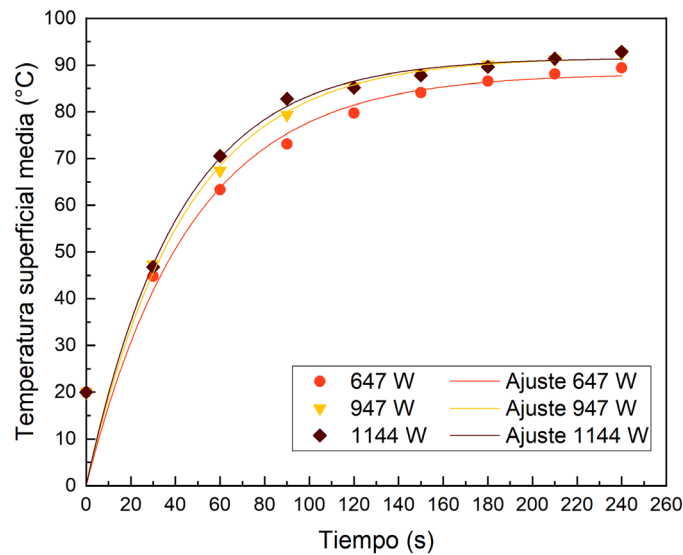


Figura IV- 50. Evolución de la temperatura superficial media durante el cocinado de panqueque a diferentes niveles de potencia.

La temperatura media proporciona una información global, pero hay que tener en cuenta que existían diferencias de temperatura entre unos puntos y otros del panqueque. Como consecuencia de esto, el cuajado de la masa no se produce de manera uniforme en toda la superficie. Tal y como se aprecia en la Figura IV- 51, la parte del panqueque de la izquierda de la imagen todavía no se ha cuajado cuando ya lo había hecho el resto de la superficie, en concreto el panqueque de la figura presentó una temperatura mínima de 63,9 °C y una temperatura máxima de 92 °C. Por ello se consideró interesante conocer no solo la temperatura media sino la temperatura mínima en la superficie del panqueque a un tiempo dado (Figura IV- 52)

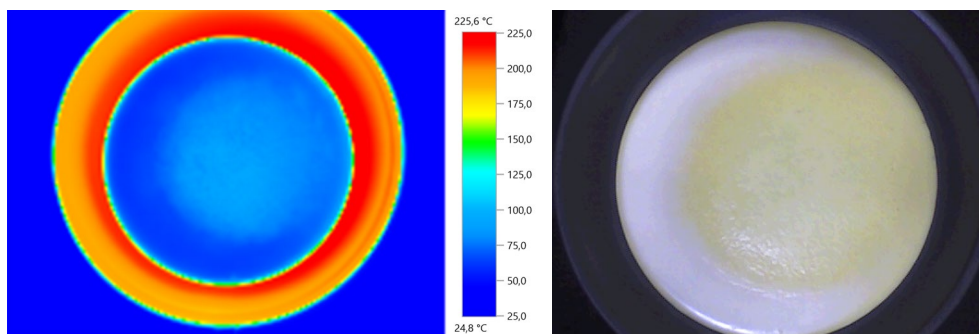


Figura IV- 51. Imagen del panqueque durante el cocinado (90s a 947 W) donde se aprecia la falta de homogeneidad del proceso de cuajado.

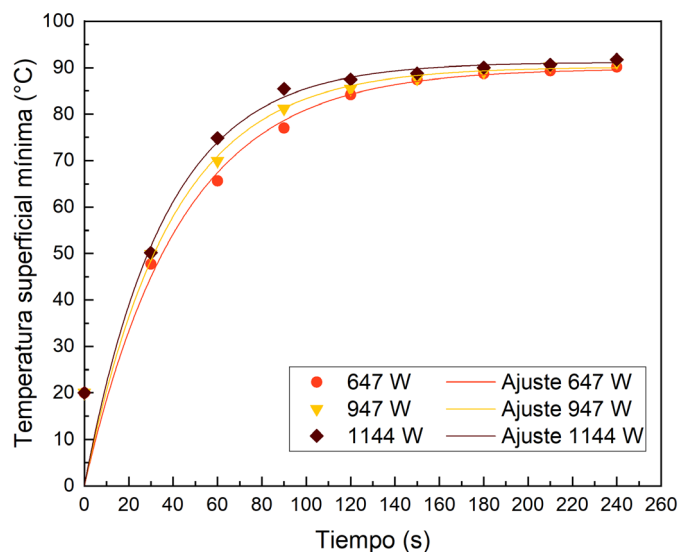


Figura IV- 52. Evolución de la temperatura superficial mínima durante el cocinado de panqueque para las tres potencias ensayadas.

4.2.2.2 Criterios para establecer la acción de dar la vuelta al panqueque

Uno de los criterios posibles para realizar la acción de dar la vuelta es en base al color del panqueque en la cara en contacto con la sartén, ya que el grado de tostado alcanzado es uno de los parámetros de calidad más importantes para los consumidores, y que con frecuencia se utiliza como un indicador de la finalización del cocinado en productos amiláceos (Isleroglu et al., 2012).

Es difícil sugerir valores estándar u objetivo para la luminosidad ya que existe una gran diversidad de productos de panadería y condiciones de operación, además de que está involucrada la preferencia de los consumidores, pero según la literatura, se estableció que el giro del panqueque debía producirse cuando la coordenada L^* fuese igual 50. Este valor de luminosidad se presenta como el característico para productos similares, como se muestra en el estudio de Esteller et al. (2006) donde obtienen una L^* de 52 al final del cocinado de un bollo, o en el de Shibukawa et al. (1989) donde las galletas presentaron una L^* entre 40 y 50. Palazoğlu et al. (2015) obtuvieron una L^* en la galleta control del 51,27 y Hedayati y Tehrani (2018) consideraron que el bizcocho de control debía de tener una L^* de 46. Para el caso del pan el promedio aceptable del valor L^* en la corteza está entre 54 y 62 (Therdthai et al., 2002). En la Figura IV- 53, se muestran las imágenes de los panqueques obtenidas experimentalmente para las tres potencias ensayadas cuando la coordenada L^* se aproxima a 50.

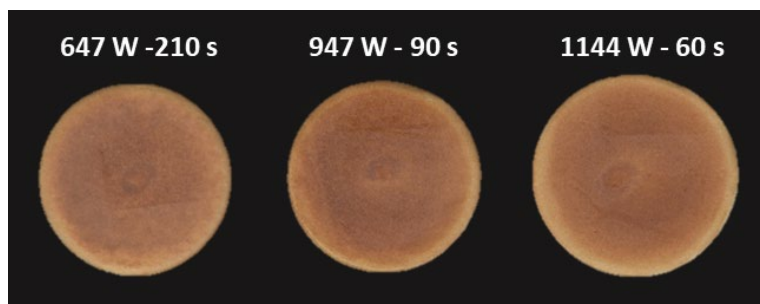


Figura IV- 53. Imágenes de panqueques cuando coordenada L^* está próxima a 50 para las tres potencias.

A partir de la evolución de la coordenada L^* (Figura IV- 47) se puede establecer el tiempo de cocción necesario para alcanzar una L^* de 50 para cada potencia. Los tiempos así obtenidos fueron: 182 s, 77 s y 55 s para las potencias de 647 W, 947 W y 1144 W respectivamente.

Es difícil establecer qué porcentaje de pérdida de peso es el adecuado para dar la vuelta al panqueque. Por eso, este criterio se ha fijado en base a la apreciación visual de cuándo la masa de panqueque aparentaba estar cuajada. El valor de pérdida de peso que cumplía esa condición coincide con una pérdida de peso del 4% para las tres potencias ensayadas. En el estudio de Feyissa et al. (2011) sobre la cocción en sartén de panqueques también obtenían experimentalmente una pérdida de peso del 4% antes de dar la vuelta. Los tiempos a los que se obtiene una pérdida de peso del 4% según la Figura IV- 48, son 85 s, 75 s y 70 s para las potencias de 647 W, 947 W y 1144 W, respectivamente.

Para asegurarnos de que han gelificado el almidón y coagulado las proteínas del huevo se tienen que alcanzar los 70 °C. A través de la Figura IV- 52 se establecen los tiempos de cocinado para que todos los puntos del panqueque del momento de dar la vuelta tuviesen una temperatura superior a esos 70 °C, obteniéndose los valores de 74 s, 63 s y 60 s para las potencias de 647 W, 947 W y 1144 W, respectivamente.

En la Tabla IV- 13 se muestran a modo de resumen los tiempos seleccionados para dar la vuelta al producto siguiendo cada uno de los tres criterios y los valores que se obtendrían para el resto de los parámetros si se utilizase ese criterio.

Cuando establecemos un valor de luminosidad como criterio para el momento del giro, la pérdida de peso difiere considerablemente de una potencia a otra. Esto es debido a que cuanto menor es la potencia de cocinado más lentamente disminuye la coordenada L^* , tal y como se observa en la Figura IV- 47 y requiere de mayor tiempo de cocinado en

potencias bajas alcanzar un mismo valor L^* . Como la pérdida de peso presenta un comportamiento lineal y tiene una mayor pendiente que la evolución de la L^* , esas diferencias de tiempos de giro se traducen en unas pérdidas de peso que son sustancialmente diferentes. La luminosidad depende de varios factores, como la pigmentación de los ingredientes, la temperatura de cocinado, etc. (Nhouchi et al., 2018), por lo que la elección de este criterio ayudaría a modificar el tiempo de cocción para que el producto tuviese un color similar independientemente de su formulación, pero ello implicaría conocer la cinética de cambio de color para cada caso ya que este parámetro no puede medirse fácilmente en una cocina doméstica en continuo. Por ejemplo, Ameur et al. (2007) demostraron que el valor L^* depende mucho de los azúcares y de la grasa utilizadas en la receta, lo que podría generar confusión sobre el punto final de cocinado. De hecho, los autores observaron un pardeamiento no enzimático diferente entre las galletas formuladas con sacarosa que necesitan un tiempo de cocción más prolongado que las de glucosa para alcanzar un nivel de color similar.

Si el criterio para realizar el giro fuese que todos los puntos de la cara superior del panqueque alcanzasen los 70 °C, entonces el panqueque cocinado a 647 W resultaría excesivamente tostada ($L^*=57,7$). Esto también ocurriría si el criterio fuese que la pérdida de peso llegase al 4 %. En este caso la luminosidad a 647 W es de 56,9. Además, a la potencia de 647 W el porcentaje de pérdida de peso está muy alejado del criterio establecido como adecuado (11,9 % frente al deseado de 4%). En este caso se descartaría la potencia de 647 W como adecuada para la elaboración de panqueques ya que para lograr el grado de tostado deseado se deberían de voltear cuando la masa no hubiese cuajado con los riesgos de derrame que esto origina, y si se prolongase el cocinado para evitar este problema, la masa estaría demasiado seca. Por lo tanto, se podría concluir que el estudio conjunto de los diferentes criterios puede servir para determinar con qué potencias no se pueden alcanzar todos los objetivos deseados.

Tabla IV- 13. Resumen de valores obtenidos para los diferentes criterios de giro posibles.

Criterio	Potencia (W)	Tiempo (s)	L^*	Pérdida peso (%)	$T_{superficial}$ media (°C)
$L^* = 50$	647	182	50,0	11,9	88,5
	947	77	50,0	4,4	77,8
	1144	55	50,0	2,5	71,4
Pérdida peso = 4%	647	85	56,9	4,4	77,3
	947	75	50,4	4,2	77,2
	1144	70	46,4	4,3	78,2
$T_{superficial} > 70\text{ °C}$	647	74	57,7	3,5	73,7
	947	63	52,5	3,1	72,3
	1144	60	49,0	2,9	74,0

4.2.3 Modelado matemático del cocinado de panqueques por contacto con una superficie caliente incorporando las propiedades reológicas de las masas. Aplicación a panqueques de diferente composición

El cocinado por contacto con superficie caliente de alimentos elaborados a partir de masas de harinas de cereales o leguminosas no se ha estudiado tan ampliamente como el cocinado en horno en términos de transferencia de calor y masa (Iribe-Salazar et al., 2018; Zhang et al., 2017). Los modelos actuales no pueden predecir adecuadamente la influencia de la composición de la masa en los fenómenos de transferencia. En el caso de los modelos de cocción de panqueques o tortitas, la conductividad térmica y la densidad del producto se expresan normalmente en función de los componentes de la masa (Feyissa et al., 2011; Sanz-Serrano et al., 2017), pero esta dependencia no es suficiente para explicar las velocidades de evaporación del agua durante la cocción de diferentes masas.

Uno de los retos fundamentales que actualmente tiene el modelado numérico es su adaptabilidad a diferentes factores como el equipo utilizado para el cocinado, la variabilidad en las propiedades físico-químicas de los alimentos inherentes a su propia naturaleza biológica o las diferentes formulaciones de las recetas. Por otra parte, existe una gran incertidumbre en muchos de los parámetros involucrados en los modelos físicos (Datta, 2007) que con frecuencia se resuelve por optimización, por ejemplo, minimizando las diferencias entre los datos experimentales y los obtenidos a partir de las simulaciones (Feyissa et al., 2011; Mercier et al., 2014; Sanz-Serrano et al., 2017). Sin embargo, sería mucho más deseable que los parámetros implicados se relacionasen con lo que fenomenológicamente ocurre y con las propiedades de las masas.

El modelado de la cocción de los panqueques es complejo debido fundamentalmente a la dificultad para conocer cómo es exactamente el contacto entre la masa y la superficie caliente, y por lo tanto, cuantificar adecuadamente la transferencia de calor entre ambas. Además, debido a las transformaciones fisicoquímicas de la masa durante la cocción, las características de dicho contacto se modifican y en consecuencia también lo hace la conductancia térmica entre la sartén y la masa. La estructura interna cambia de una masa viscosa a una estructura heterogénea (Cernela et al., 2015; Guibert-Martin et al., 2017). El agua migra a través de la superficie exterior en forma de vapor, por lo que las propiedades de las distintas harinas afectan claramente al transporte de humedad. Estos cambios están ligados a las propiedades reológicas. La capacidad de la masa para retener pequeñas burbujas se ha relacionado con su viscosidad, que a su vez varía según la harina utilizada (Turabi et al., 2008). La estructura depende de las propiedades de empastado o “pasting” de la masa (Kaur y Singh, 2005; Kaushal et al., 2012) y la consistencia del gel de las propiedades viscoelásticas (Hesso et al., 2015). A su vez, estas propiedades reológicas dependen de la composición de la masa, la presencia o ausencia de gluten, y la cantidad y tipo de almidón y fibra, entre otros factores. Sin embargo, las propiedades reológicas de la masa normalmente no se consideran en el modelado de la cocción. Dos excepciones son el trabajo de Decindio y Carrera (1995) que utilizaron la viscoelasticidad de la masa para cuantificar el fenómeno de expansión de las burbujas de gas, y el de Lostie et al. (2002a), que relacionaron el cambio de volumen de la masa originado por la sobrepresión de la fase gaseosa con la viscosidad.

Por todo ello, se planteó como objetivo desarrollar un modelo matemático para la cocción de panqueques por contacto con una superficie caliente que relacionase los fenómenos de transferencia de calor entre dicha superficie y la masa con los cambios fisicoquímicos que ocurren en la masa durante el proceso de cocción. Además, con el modelo se debería poder simular el proceso de cocción de masas que tuviesen diferentes formulaciones. A diferencia de los modelos previos de cocción de panqueques, este modelo consideraría los cambios en las propiedades de transferencia de calor como una consecuencia de la formación de la costra en la zona más cercana de la masa a la superficie caliente. Además, se tuvo en cuenta que algunos aspectos claves del modelo como el contacto entre la masa y la superficie caliente y la velocidad de evaporación del agua dependen de la relación entre la temperatura y la viscosidad de la masa. Para lograr este

objetivo, se determinaron experimentalmente las propiedades fisicoquímicas y reológicas de siete masas de panqueques elaboradas con diferentes tipos de harinas (trigo, espelta integral, avena integral, arroz integral, maíz, garbanzo y lenteja). Los resultados experimentales se usaron para obtener parámetros del modelo dependientes de las propiedades de las masas que proporcionaron información clave sobre el comportamiento durante la cocción de masas de diferente composición.

4.2.3.1 Propiedades físicoquímicas de las diferentes harinas utilizadas en la elaboración de las masas

La facilidad con la que el agua se evapora durante el cocinado de los panqueques depende, entre otros factores, de las propiedades de hidratación de las diferentes harinas que se han utilizado en la elaboración de las masas. Estas propiedades se determinaron a partir del índice de absorción de agua (WAI), el índice de solubilidad de agua (WSI) y la capacidad de absorción de agua (WAC). Los valores de WSI, WAI y WAC obtenidos para las diferentes harinas se muestran en la Tabla IV- 14. Se encontraron diferencias significativas en estos parámetros ($p < 0,05$) entre las distintas harinas, por lo tanto, es de esperar que también haya diferencias en la velocidad de evaporación del agua durante la cocción de las diferentes masas y consecuentemente en la pérdida de peso.

Las harinas de leguminosas (garbanzo y lenteja) presentaron los valores más altos para los tres parámetros analizados, lo que puede asociarse a su baja humedad y alto contenido en proteínas y fibra. Anton et al. (2008), también obtuvieron valores más altos de absorción de agua en las harinas de leguminosas que en la de trigo, lo que podría atribuirse a mayores cantidades de constituyentes hidrofílicos, como los polisacáridos (Kaur y Singh, 2005). El WSI es un indicador de la cantidad de sustancias solubles como almidón y aminoácidos, siendo las harinas de leguminosas y la harina integral de espelta las que presentan valores más elevados de este parámetro. El WAI se relaciona con la integridad del almidón en la dispersión acuosa. Este índice en las harinas de arroz, maíz y espelta es sensiblemente menor que en la harina de trigo. Los valores obtenidos para este parámetro concuerdan con los obtenidos por Kaushal et al. (2012). La WAC también es un indicador del potencial de las moléculas de proteína para absorber humedad (Anton et al., 2008; Kaushal et al., 2012). Este parámetro se ha asociado con el contenido de fibra y con la solubilidad de las biomoléculas (Kaushal et al., 2012; Wilderjans et al., 2013).

Cuando se analizan masas amiláceas es complejo establecer una relación entre los contenidos de proteína y fibra y la absorción de agua debido a que las harinas difieren en los contenidos en proteínas y fibra (Tabla III- 6) y en la solubilidad de estas proteínas, ya que las proteínas de gluten presentes en el trigo y la espelta son insolubles. Además, la harina de avena tiene un alto contenido en beta-glucanos lo que favorece la retención de mayor cantidad de agua. (Ahmed y Thomas, 2015; Majzoobi et al., 2016). WSI, WAI y WAC son parámetros que caracterizan las propiedades funcionales de la harina, pero en la masa están presentes otros componentes proporcionados por el huevo y la leche. Las propiedades fisicoquímicas de las harinas en presencia de otros componentes, como por ejemplo las proteínas animales, sufren modificaciones que deben ser consideradas (Bravo-Nunez y Gomez, 2019). La interacción entre todos los constituyentes es lo que va a indicar la evolución de la pérdida de agua de la masa durante la cocción.

Tabla IV- 14. Índice de absorción de agua (WAI), índice de solubilidad de agua (WSI), y capacidad de absorción de agua (WAC) de diferentes harinas.

<i>Harina</i>	<i>WSI (%)</i>	<i>WAI</i>	<i>WAC</i>
Trigo	8,57±0,27 c	6,21±0,13 c	0,74±0,01 b
Espelta integral	10,03±0,39 d	4,27±0,06 a	0,70±0,01 a
Avena integral	4,57±0,24a	6,32±0,09 cd	1,14±0,02 d
Arroz integral	4,38±0,25 a	4,37±0,05 a	1,09±0,01 c
Maíz	5,66±0,25 b	5,82±0,05 b	1,21±0,03 e
Garbanzo	14,76±0,82 e	6,46±0,13 d	1,40±0,02 f
Lenteja	25,39±0,60 f	7,78±0,17 e	1,43±0,01 g

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre valores de una misma columna.

4.2.3.2 *Propiedades reológicas de las masas*

Para determinar la influencia de la composición en el comportamiento de las diferentes masas durante la cocción se realizó un análisis reológico que permite predecir cómo va a ser la respuesta de la masa a flujos complejos y condiciones de deformación y en consecuencia cuál va a ser su evolución durante el cocinado (Dobraszczyk y Morgenstern, 2003).

Las curvas de flujo, que muestran la variación del esfuerzo cortante con la velocidad de deformación, se muestran en la Figura IV- 54. Los resultados revelan el comportamiento pseudoplástico de las diferentes masas. Este tipo de fluidos no poseen un umbral de fluencia para que comiencen a deformarse.

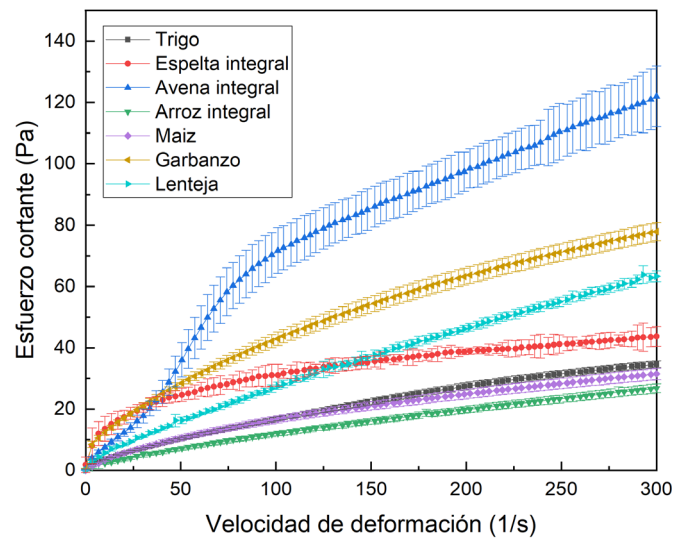


Figura IV- 54. *Esfuerzo cortante frente a velocidad de deformación de las diferentes harinas,*

Los datos de las curvas de flujo se ajustaron a la ecuación de la ley de potencia según la cual los fluidos pseudoplásticos presentan una relación potencial entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación de acuerdo a la ec. (3.5):

Para todas las masas, los coeficientes de determinación (R^2) fueron superiores a 0,997, excepto la masa con harina de avena ($R^2 = 0,975$). Los parámetros del modelo de ley de potencia (índice de consistencia, K , índice de comportamiento de flujo, n) se muestran en la Tabla IV- 15. El índice de flujo está comprendido entre 0,325 y 0,764, lo que indica su carácter no-newtoniano. Las masas mostraron un comportamiento pseudoplástico, donde la viscosidad aparente disminuyó con el aumento de velocidad de deformación debido a la alineación de la microestructura con la dirección de flujo. Todas las masas tienen una consistencia (K) menor que las obtenidas en un estudio previo realizado con masa de bizcocho (Huang y Yang (2019)). La consistencia de la masa está relacionada con la incorporación y retención de aire durante el horneado (Turabi et al., 2008), y en un producto tipo bizcocho se produce un batido mucho más intenso. El índice de flujo fue significativamente menor y la consistencia mucho más alta ($p < 0,05$) en la masa de harina de avena integral y de garbanzo que, en las demás harinas, indicando mayor pseudoplasticidad y consistencia en estas dos masas cuando se les somete a grandes deformaciones. Esta diferencia puede deberse a la distinta composición de estas harinas, ya que los altos contenidos en proteína y fibra (Tabla III- 6) reducen la cantidad de agua libre disponible, limitando el movimiento de partículas en la masa y dando así un alto índice de consistencia. La masa de harina de arroz, debido al bajo contenido de

proteínas y la baja solubilidad y funcionalidad de éstas, presentó la consistencia más baja, lo que indica una capacidad limitada para la retención de burbujas.

Tabla IV- 15. Valores de gravedad específica (SG) y constantes de la ley de potencia para diferentes masas: índice de consistencia (K), índice de flujo (n) y coeficiente de determinación (R^2).

<i>Masa</i>	<i>SG</i>	<i>K (Pa·sn)</i>	<i>n</i>	<i>R²</i>
Trigo	1,143±0,016 c	0,754±0,014 a	0,676±0,003 d	0,999
Espelta integral	1,128±0,021 bc	6,905±0,089 c	0,325±0,002 a	0,997
Avena integral	1,116±0,008 bc	3,771±0,304 b	0,614±0,015 c	0,975
Arroz integral	1,141±0,002 c	0,411±0,003 a	0,732±0,002 e	1,000
Maíz	1,140±0,012 c	1,002±0,015 a	0,606±0,003 c	0,999
Garbanzo	0,990±0,022 a	3,268±0,040 b	0,558±0,002 b	0,999
Lenteja	1,107±0,012 b	0,812±0,010 a	0,764±0,002 e	0,999

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre valores de una misma columna.

La gravedad específica de la masa (SG) es también un parámetro indicador de su capacidad de retención de aire. Los valores obtenidos (Tabla IV- 15) son mayores que los encontrados en la bibliografía para masas de bizcocho elaboradas con harina de trigo, lo que indica una menor aireación de las masas de panqueque (Gomez et al., 2010). Sólo la sustitución de la harina de trigo por la harina de legumbre conduce a una disminución en la gravedad específica de la masa. Normalmente, en las masas de bizcocho se desea una baja gravedad específica (densidad) porque indica que mayor cantidad de aire puede incorporarse en la masa y por lo tanto, que durante la cocción el producto alcance un mayor volumen final (Turabi et al., 2008). Sin embargo, esta característica no es decisiva en las masas para panqueques o tortitas debido al pequeño grosor del producto final.

La Tabla IV- 16 muestra la viscosidad inicial a 25 °C, $\eta_{25^\circ\text{C}}$, y las propiedades de “pasting” de las diferentes masas obtenidas del ensayo de barrido de temperatura que se muestra en la Figura IV- 55. Las masas tienen una baja viscosidad inicial ($\eta_{25^\circ\text{C}} < 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), valores inferiores incluso a las obtenidas en el estudio de panqueques de Guibert-Martin et al. (2017). La viscosidad de la masa debe de ser suficiente como para retener burbujas, pero no tan alta como para que se produzcan panqueques de textura pegajosa. Además, la generación de corrientes de convección en la masa durante el cocinado depende de la viscosidad inicial de la masa y de la evolución de la viscosidad aparente durante el calentamiento (Martinez-Cervera et al., 2012). La harina de maíz y de arroz presentaron los valores de viscosidad más bajos, vinculados a su bajo contenido proteico. Estos resultados son consistentes con los encontrados en la bibliografía (Guadarrama-Lezama

et al., 2016; Sahagun et al., 2018; Turabi et al., 2008). Esta característica se ha correlacionado con una estructura más densa de los productos horneados (Baixauli et al., 2008). Las masas de leguminosas presentaron viscosidades superiores a la masa de trigo, como también han observado otros autores (Álvarez et al., 2017), debido a su riqueza en fibra, que es 3,5 y 5,5 veces mayor, respectivamente, para la lenteja y el garbanzo que para la harina de trigo (Tabla III- 6). Las harinas de leguminosas tienen los mayores contenidos proteicos, lo que indica un marcado potencial de absorción de humedad y una notable capacidad emulsionante. La masa de avena presentó los valores más altos, debido a su elevado contenido en beta-glucanos. En numerosos estudios se ha encontrado una alta correlación positiva entre la viscosidad y el contenido de beta-glucanos solubles (Ahmad et al., 2009; De La Hera et al., 2013; Gularte et al., 2012).

Durante el horneado a temperaturas inferiores a 60 °C, la viscosidad disminuyó ligeramente a un valor mínimo (Figura IV- 55) permitiendo que las burbujas de aire se movieran y aumentaran su tamaño. Cuando la temperatura alcanzó 60 °C, se observó un rápido aumento de la viscosidad, tal y como han descrito otros autores (Guibert-Martin et al., 2017). Este aumento se ha relacionado con la gelatinización del almidón, la desnaturalización y coagulación de la proteína del huevo y la evaporación del agua. Las temperaturas de “pasting”, T_p , oscilaron entre 59,9 °C (trigo) y 69,2 °C (maíz), y los valores máximos de viscosidad, η_{max} , se obtuvieron a temperaturas entre 75,3 °C (avena) y 81,9 °C (maíz). Las harinas de cereales sin gluten, maíz y arroz, presentaron las mayores temperaturas de “pasting”. Las propiedades de “pasting” se ven afectadas principalmente por el tipo y la cantidad de almidón, y los resultados indican que las interacciones proteína-almidón disminuyeron los valores de T_p y η_{max} .

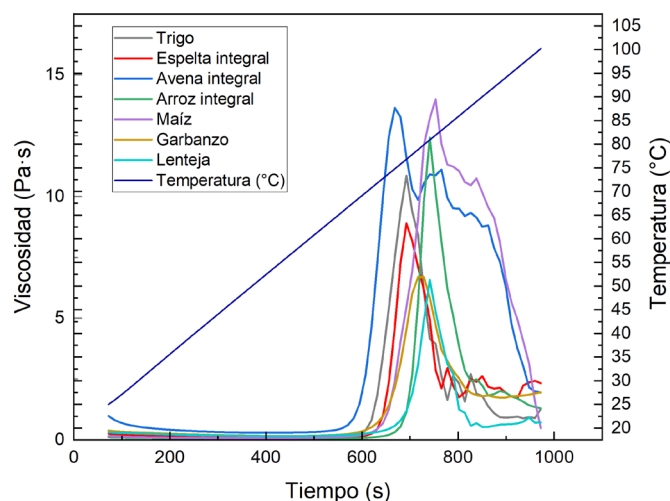


Figura IV- 1. Evolución de la viscosidad de las diferentes masas con la temperatura.

Tabla IV- 16. Propiedades de “pasting” de las distintas masas.

Masa	$\eta_{25^{\circ}\text{C}}$ (Pa·s)	η_{T_P} (Pa·s)	T_P (°C)	η_{max} (Pa·s)	$T_{\eta_{\text{max}}}$ (°C)
Trigo	0,162±0,021a	0,074±0,006 a	59,9±0,1 a	10,857±0,915 c	77,0±0,0 b
Espelta integral	0,259±0,017 b	0,105±0,004 b	62,6±0,8 b	8,896±0,644 b	77,3±0,6 b
Avena integral	0,984±0,122 d	0,365±0,011 e	63,3±0,6 bc	13,645±1,202 e	75,3±0,5 a
Arroz integral	0,108±0,003 a	0,072±0,014 a	67,1±1,9 d	12,423±0,415 d	81,0±0,0 d
Maíz	0,153±0,003 a	0,213±0,002 d	69,2±0,5 e	14,000±0,071 e	81,9±0,0 e
Garbanzo	0,385±0,020 c	0,196±0,013 c	63,4±0,4 bc	6,698±0,322 a	79,5±0,5 c
Lenteja	0,315±0,027 bc	0,192±0,008 c	64,5±1,0 c	6,577±1,076 a	81,3±0,5 d

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre valores de una misma columna.

Los resultados de los ensayos oscilatorios llevados a cabo a 25 °C mostraron que los módulos de almacenamiento (G') eran superiores a los módulos de pérdida (G'') para todas las masas, comportamiento típico de geles blandos y una red estructural débil (Tabla IV- 17). Para la masa de harina de trigo, el factor de pérdida, $\tan \delta$, fue de 0,98, con módulos similares de G' y G'' , indicando que se trata de un producto más viscoso y menos elástico. Sin embargo, el valor de $\tan \delta$ para las masas formuladas con harina de espelta fue de 0,27, reflejando un comportamiento más estructurado y más próximo al de un sólido. Esto puede ser debido que la harina de espelta tiene un mayor contenido de proteínas y gluten que el trigo común (Geisslitz et al., 2019). El uso de harinas de

leguminosas (garbanzo y lenteja) indujo un efecto endurecedor en la estructura de la masa (aumento de G' y G'') en comparación con la masa de trigo, debido a su mayor contenido en proteínas y fibra, mostrando un comportamiento similar al encontrado por Matos et al. (2014) para otras leguminosas. El módulo G' dependía fuertemente de la deformación; en consecuencia, el ángulo de fase aumentó con la deformación. La deformación a la que se produjo el cambio de sólido ($\tan \delta < 1$) a comportamiento líquido ($\tan \delta > 1$) se muestra en la Tabla IV- 17. Los valores de la deformación para $\tan \delta = 1$ fueron extremadamente altos en la masa de espelta integral (12,95) y bajos para la del trigo (0,27), el arroz y el maíz (0,89). Los valores bajos se han relacionado con una mayor tendencia a fluir y, por lo tanto, con microestructuras de masa frágiles (Guadarrama-Lezama et al., 2016).

Tabla IV- 17. Medidas viscoelásticas para las distintas masas.

Masa	G' (Pa)	G'' (Pa)	$\tan \delta$	Deformación (%)
	En el rango lineal de (0,1 % of deformación)			a $\tan \delta = 1$
Trigo	8,66±0,80a	8,86±0,06 ab	1,03±0,09 e	0,27±0,02 a
Espelta integral	279,13±35,47 c	75,75±8,25 e	0,27±0,01 a	12,95±0,43 e
Avena integral	53,44±6,34 b	25,38±1,18 d	0,48±0,03 b	3,29±0,25 d
Arroz integral	5,50±0,20 a	4,73±0,02 a	0,86±0,03 d	0,89±0,07 b
Maíz	5,62±1,92 a	3,51±0,53 a	0,66±0,10 b	0,89±0,07 b
Garbanzo	29,23±4,38 ab	17,89±4,02 c	0,61±0,04 b	1,91±0,14 c
Lenteja	21,56±4,21 a	12,99±2,40 bc	0,60±0,01 b	1,75±0,11 c

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre valores de una misma columna.

4.2.3.3 Evolución de la temperatura y la pérdida de peso durante el cocinado de las masas

Sobre una sartén de 180 mm de diámetro se adicionaron 100 mL de masa cuando la temperatura inicial de la sartén era de 230 ± 2 °C y se cocinaron los panqueques durante 4 min a una potencia de 947 ± 4 W. Se registró en continuo el peso de la masa y se tomaron imágenes termográficas de la superficie superior del panqueque. En la Figura IV- 56 se representan los resultados experimentales obtenidos para la temperatura promedio en la cara superior del panqueque y la pérdida de peso durante la cocción. La pérdida de peso al final del proceso presentó grandes diferencias según el tipo de harina. La masa que pierde menos peso es la elaborada con harina de avena integral, 9,71 %, posiblemente debido al ya mencionado alto contenido en beta-glucanos que favorece la retención de mayor cantidad de agua (Ahmed y Thomas, 2015; Majzoobi et al., 2016). La pérdida de

peso de las masas elaboradas con harina de leguminosas es superior a la de la masa de harina de avena e inferior a todas las demás, tomando valores muy parecidos para el garbanzo y la lenteja (16,10 % y 15,88 %, respectivamente). El alto contenido en proteínas de las harinas de leguminosas (29,02% para la harina de garbanzo y 24,87 % para la de lenteja, Tabla III- 6) puede ser la explicación para que estas masas retengan mayor cantidad de agua que el resto de las harinas a excepción de la de avena. La pérdida de las masas de trigo y espelta es muy similar (18,80 y 19,00 %), como también lo es su contenido en proteínas (11,00 y 12,70 %, respectivamente). Las pérdidas de peso de las masas de harina de maíz (20,01 %) y de arroz (21, 33 %) son las más elevadas, correspondiendo a los bajos valores del contenido proteico de dichas harinas (9,01 y 6,50 %, respectivamente).

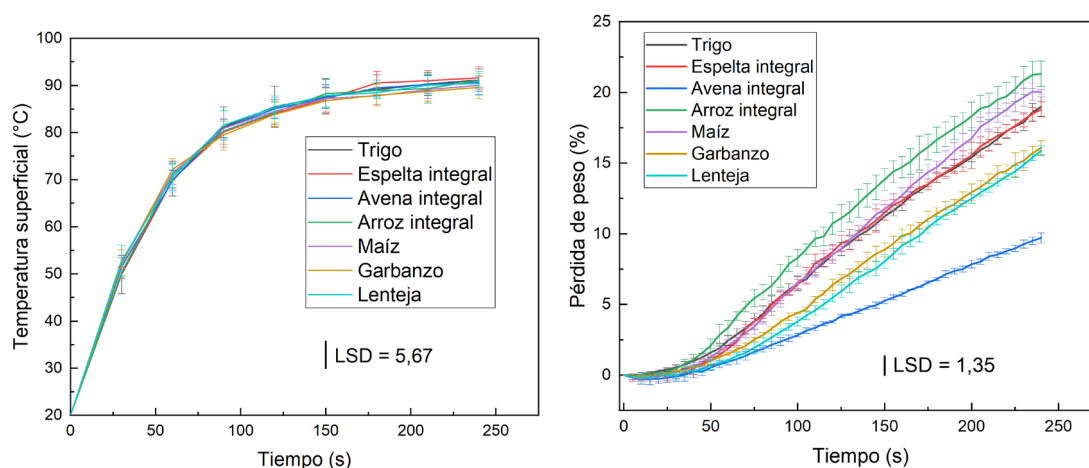


Figura IV- 2. Resultados experimentales de la temperatura superficial media y pérdida de peso de los panqueques durante el cocinado, Los datos mostrados son las medias ($\pm$) desviación estándar de cinco replicas, Barra vertical = diferencias mínimas significativas (LSD) agrupadas al nivel del 5%.

Para corroborar la relación entre las propiedades fisicoquímicas de las harinas, las propiedades reológicas de las masas y la pérdida de peso, se realizó un análisis de correlación (Tabla IV- 18). El coeficiente de correlación de Pearson nos indica cuanto de asociadas se encuentran dos parámetros entre sí. Se obtuvo que la pérdida de peso y viscosidad inicial de la masa están correlacionadas con una significancia de $p < 0,01$, con un valor de -0,940. El valor negativo señala que los parámetros se relacionan inversamente, es decir cuanto mayor viscosidad inicial presentan las masas, menos pérdida de peso se va a producir.

Tabla IV- 18. Coeficiente de correlación de Pearson para la relación entre las propiedades de harinas y masas y la pérdida de peso.

	<i>WAI</i>	<i>WAC</i>	<i>K</i> (Pa·s ⁿ)	<i>SG</i>	$\eta_{25^{\circ}\text{C}}$ (Pa·s)	η_{T_P} (Pa·s)	<i>T_P</i> (°C)	<i>Deformación</i> (%)	<i>Pérdida de peso</i> (%)
WSI (%)	0,716**	0,501**	-0,049	-0,381	-0,070	-0,002	-0,170	0,002	-0,142
WAI		0,629**	-0,384*	-0,342	0,287	0,442*	-0,164	-0,501*	-0,483*
WAC			-0,386*	-0,529*	0,171	0,437*	0,429*	-0,520*	-0,302
<i>K</i> (Pa·s ⁿ)				-0,202	0,366	0,171	-0,336	0,877**	-0,314
SG					-0,203	-0,198	0,152	0,069	0,283
$\eta_{25^{\circ}\text{C}}$ (Pa·s)						0,888**	-0,227	0,091	-0,940**
η_{T_P} (Pa·s)							0,097	-0,095	-0,807**
<i>T_P</i> (°C)								-0,243	0,428
Strain (%)									-0,006

**p<0,01; *p< 0,05, Deformación (%) a $\tan \delta = 1$.

Al contrario de lo que sucede con la pérdida de peso, la temperatura en la superficie de las masas durante su cocinado (determinada a partir de imágenes termográficas) sigue una misma evolución independientemente de la composición de las masas (Figura IV- 56).

4.2.3.4 Descripción y suposiciones del modelo

En colaboración con el grupo de Mecánica Aplicada y Bioingeniería (AMB) del IA3 se desarrolló un modelo axisimétrico 2D que consideraba simultáneamente la transferencia de calor y masa en estado no estacionario durante la cocción de panqueques por contacto con una superficie caliente (sartén). Nuestra contribución al modelo ha consistido en:

- Establecer las suposiciones del modelo en base a las evidencias experimentales.

ii. Obtener los parámetros experimentales que el modelo requiere como datos de entrada (composición y propiedades reológicas de las masas) y relacionarlos con otros parámetros incluidos en las ecuaciones que describen la transmisión de calor y la transferencia de masa.

iii. Verificar y validar del modelo con datos experimentales para diferentes tipos de harinas.

Este modelo incluye varias suposiciones que comenzaban con una representación axisimétrica de la geometría y de la distribución de potencia de calentamiento. Se consideró que eran despreciables los cambios de volumen de la masa debido a su comportamiento razonablemente viscoso, por lo que sólo se consideraron los transportes de calor y materia. Además, como el espesor del panqueque es pequeño (3 mm) y se consideró que no se generaba sobrepresión en la fase gaseosa, no se tuvo en cuenta el transporte de cantidad de movimiento en el interior de la masa. La sartén se calentaba por un flujo de calor constante y se transmitía a la masa con una conductancia térmica muy elevada que disminuye drásticamente cuando la viscosidad aumenta y se forma la corteza en la parte inferior del panqueque en contacto con la sartén. El calor se transfería dentro de la masa de panqueques por conducción, y la convección constituyó el mecanismo de pérdida de calor en la superficie externa. El agua líquida se mueve por difusión en el interior de la masa mientras se produce simultáneamente su evaporación local, por lo tanto, en el interior de la masa el agua está tanto en fase líquida como en fase vapor. Por lo tanto, la masa es un sistema trifásico (sólido, agua líquida y vapor de agua). El transporte de agua líquida y de vapor de agua a través del panqueque se consideró por separado como un transporte bifásico. Finalmente, el vapor de agua generado en el interior de la masa se transporta hasta la superficie y posteriormente difunde hacia el ambiente que rodea al panqueque.

En las ecuaciones que gobiernan las transferencias de calor y materia están involucrados las siguientes variables que dependen, entre otros factores de la composición de la masa:

- La densidad y el calor específico de la masa. Se calcularon a partir de la densidad y la conductividad térmica de sus constituyentes (sólido, líquido y vapor) ponderados mediante las fracciones másicas de cada uno de ellos (Nesvadba,

2014). Inicialmente, cuando no hay vapor presente en la masa los valores que adoptan estos parámetros para masas de diferente composición se muestran en la Tabla IV- 19.

Tabla IV- 19. Densidad inicial, ρ_{p_0} , fracción másica de líquido, X_{l_0} , fracción másica de sólido, X_{s_0} , y calor específico, $C_{p_{p_0}}$, a temperatura ambiente para las diferentes masas.

Masa	ρ_{p_0} (kg/m³)	X_{l_0}	X_{s_0}	$C_{p_{p_0}}$ (J/kg K)
Trigo	1135,11	0,6812	0,3188	3357,82
Espelta entera	1141,09	0,6738	0,3262	3344,96
Arroz integral	1138,53	0,6762	0,3238	3337,73
Avena integral	1151,55	0,6683	0,3317	3335,85
Lenteja	1135,66	0,6657	0,3343	3337,90
Maíz	1142,06	0,6722	0,3278	3335,43
Garbanzo	1143,64	0,6640	0,3360	3335,47

- La conductividad térmica de la masa, λ_p . Para su determinación se adoptó la fórmula desarrollada por Maxwell (Lostie et al., 2002a; Rao et al., 2005) según la cual depende de la fracción másica de agua líquida, X_l , de la porosidad de la masa, ε , de la conductividad térmica del aire λ_{air} , y de otros dos parámetros, a y b .
- La energía absorbida durante la evaporación del agua. Este término del balance de energía se calcula como el producto de la densidad de la masa, el calor latente de evaporación, la constante de velocidad de vaporación (σ_{evp}), y una función empírica, f_v . A su vez, f_v , se es una función de la temperatura y de otros dos parámetros: la temperatura cuando la viscosidad de la masa es máxima, $T_{\eta_{max}}$, y del parámetro, ξ . Tanto $T_{\eta_{max}}$ como ξ se obtuvieron al ajustar los datos experimentales de la variación de la viscosidad normalizada con la temperatura obtenidos a partir del análisis reológico (Figura IV- 57 y Tabla IV- 20).

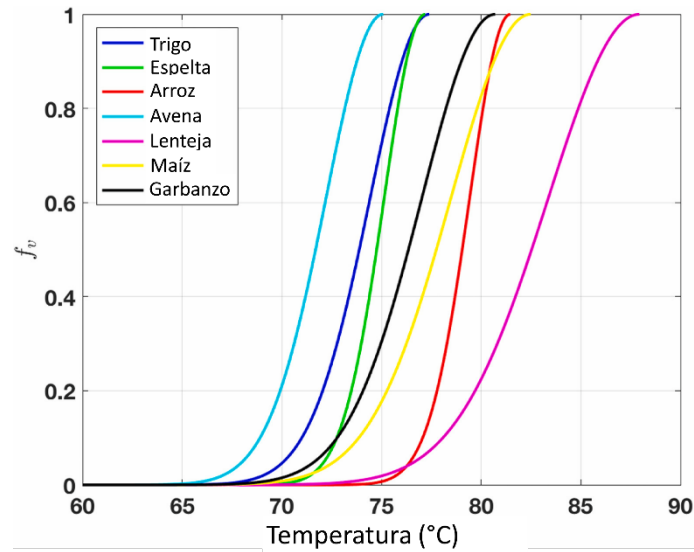


Figura IV- 3. Ajuste de los datos experimentales de la variación de la viscosidad normalizada con la temperatura obtenidos a partir del análisis reológico.

Tabla IV- 20. Valores de los parámetros de las diferentes masas obtenidos del ajuste entre viscosidad y temperatura.

Harina	$T_{\eta_{max}}(^{\circ}\text{C})$ ajustados	$\xi (^{\circ}\text{C})$	R^2
Trigo	74,7	3,33	0,9941
Espelta integral	75,4	2,09	0,9951
Arroz integral	79,7	1,97	0,9947
Avena integral	72,4	2,78	0,9938
Lenteja	80,5	2,99	0,9922
Maíz	78,5	4,13	0,9859
Garbanzo	76,9	2,86	0,9644

- La conductancia entre la masa y la sartén, h_{cp} . Este parámetro se calcula como el producto de la conductancia en los instantes iniciales multiplicada por $(1 - f_v)$.
- La difusividad del agua líquida, D_l , y del vapor de agua, D_v , a través de la masa.
- El coeficiente de transferencia del vapor desde la superficie superior del panqueque hacia el aire, k_v .
- El coeficiente de transferencia de calor por convección entre la masa y el aire, h_p .

4.2.3.5 Optimización de las variables del modelo

El modelo se implementó en COMSOL Multi-physics® v.5.2^a. Usando un algoritmo de optimización disponible en el propio software (SNOPT), se establecieron dos funciones objetivo con las que minimizar las desviaciones entre los datos experimentalmente

obtenidos y las predicciones del modelo. Estas funciones fueron la evolución con el tiempo de la temperatura en la superficie superior del panqueque y de la pérdida de peso. Las variables seleccionadas para su optimización en base a su variabilidad de acuerdo con los datos disponibles en la bibliografía fueron: la constante de velocidad de evaporación del agua (σ_{evp}), los coeficientes de difusión del agua y del vapor (D_l y D_v), el coeficiente de transferencia de masa de vapor (k_v), los parámetros que intervienen en el cálculo de la conductividad térmica de la masa (a y b), el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el panqueque y el aire (h_p) y la conductancia de contacto entre la masa y la sartén (h_{cp}).

En la Tabla IV- 21 se muestran los valores de las variables que se optimizaron para las diferentes masas. Como puede observarse, los valores más altos de la constante de la velocidad de vaporación y de las difusividades (σ_{evp} , D_v y D_l) se obtuvieron para la masa de harina de arroz. Estos parámetros gobiernan la velocidad a la que el agua se evapora y se transporta en el interior del panqueque. Experimentalmente se comprobó que la masa de arroz, debido a su bajo contenido de proteína y fibra, tenía la menor consistencia, lo que significa una baja capacidad de retención de burbujas lo que permite la evaporación rápida y la pérdida de vapor a través de la superficie de la masa. El efecto contrario se observó en la masa de avena integral, rica en beta-glucanos. Esta masa tiene la mayor consistencia según los datos experimentales y en coherencia la optimización del modelo le asigna los valores más bajos de σ_{evp} y de difusividad del vapor D_v . Además, el coeficiente de transferencia de masa del vapor desde el panqueque al aire, k_v , para la masa de avena es el menor de todos para ajustarse a la función objetivo de pérdida de peso de la Figura IV- 56. Debido a la novedad de este estudio, ya que no se ha encontrado en la literatura ningún modelo que tenga en cuenta la cocción de masas en cocciones sobre superficie caliente elaboradas con harinas diferentes a la de trigo, no se ha podido contrastar el valor de estos parámetros con resultados anteriores. Sin embargo, algunos estudios previos propusieron desarrollos equivalentes para la cocción por contacto de panqueques de harina de trigo. En el trabajo de Sanz-Serrano et al. (2017), la constante de la velocidad de evaporación $\sigma_{evp} = 5,44 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ se determinó después de un proceso de optimización, y Feyissa et al. (2011) la ajustaron a los resultados experimentales con un valor medio de $\sigma_{evp} = 11,4 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Sin embargo, las

difusividades y el coeficiente de transferencia de masa del vapor obtenidos en este estudio mostraron ligeras diferencias con los utilizados por los autores mencionados. Las diferentes suposiciones del modelo, incluidos los espesores del producto y el método para obtener otros parámetros, pueden ser la causa de estas discrepancias. Además, hay que señalar que los parámetros proporcionados por esos trabajos anteriores (Feyissa et al., 2011; Sanz-Serrano et al., 2017) no son capaces de reproducir el comportamiento de masas con diferentes composiciones.

Tabla IV- 21. Resultados de la optimización de los parámetros en el modelo para las masas elaborados con diferentes harinas.

Harinas	σ_{evp} (s^{-1})	D_v ($m^2 s^{-1}$)	D_l ($m^2 s^{-1}$)	k_v ($m s^{-1}$)	a ($W m^{-1} K^{-1}$)	b ($W m^{-1} K^{-1}$)	h_p ($W m^{-2} k^{-1}$)
Trigo	$5,1623 \cdot 10^{-4}$	$9,6599 \cdot 10^{-8}$	$4,3337 \cdot 10^{-10}$	0,0421	0,8026	0,8374	14,4698
Espelta entera	$5,2813 \cdot 10^{-4}$	$1,6153 \cdot 10^{-7}$	$1,8579 \cdot 10^{-9}$	0,0555	0,8218	0,6395	14,8464
Arroz integral	$6,5610 \cdot 10^{-4}$	$4,1314 \cdot 10^{-7}$	$4,4596 \cdot 10^{-9}$	0,0639	0,7776	0,5290	14,9739
Avena integral	$3,0727 \cdot 10^{-4}$	$4,2502 \cdot 10^{-8}$	$1,5381 \cdot 10^{-9}$	0,0023	0,9280	0,6370	15,2623
Lenteja	$4,4458 \cdot 10^{-4}$	$9,8016 \cdot 10^{-8}$	$6,9666 \cdot 10^{-10}$	0,0459	0,8873	0,5821	14,9858
Maíz	$5,7626 \cdot 10^{-4}$	$1,2582 \cdot 10^{-8}$	$1,6668 \cdot 10^{-9}$	0,0493	0,9291	0,7475	14,9846
Garbanzo	$4,6349 \cdot 10^{-4}$	$8,0770 \cdot 10^{-7}$	$7,9541 \cdot 10^{-10}$	0,0474	0,8989	0,6864	14,9901

Aunque no se incluye en la Tabla IV- 21, la conductancia de contacto térmico h_{cp} también se consideró en el algoritmo de optimización. Para las siete masas analizados, se obtuvo un valor de $h_{cp} = 2000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Este valor supone un gran flujo de calor que inicialmente se transfiere entre la sartén y la masa. Pero cuando la temperatura de la masa alcanza la temperatura de “pasting”, T_p , este flujo disminuye de acuerdo con la función de penalización $(1 - f_v)$. Por lo tanto, el modelo tuvo en cuenta la formación de costra en la parte inferior del panqueque en contacto con la superficie de calentamiento. Físicamente, esta región consta de una fase porosa sólida a través de la cual el agua líquida y el vapor generado cerca de la superficie inferior se mueven hacia una zona superior de masa cruda hasta que el vapor se difunde al medio ambiente. La formación de la costra modifica la conductancia térmica de contacto y la evolución de las propiedades de transferencia de calor del producto y, en consecuencia, disminuye la velocidad de generación de vapor en la parte inferior del panqueque. La temperatura a la que se

producen estos cambios y su intensidad depende de las características de la masa, y en concreto, como se ha razonado en este trabajo, de las propiedades reológicas de la masa. Por otra parte, los factores que más influyen en las propiedades reológicas de las masas son el contenido y tipo de proteínas y fibra. Por tanto, parece que estos aspectos composicionales de la masa son los que regulan los cambios en los fenómenos de transporte resultantes de la formación de la costra. Aunque se ha descrito experimentalmente previamente (Cernela et al., 2015; Guibert-Martin et al., 2017), hasta donde sabemos, la formación de costras y sus consecuencias para los fenómenos de transporte no se han modelado en el cocinado de masas por contacto con una superficie caliente.

Los parámetros que controlaban la conductividad térmica de la masa en, a y b , no varían mucho entre las diferentes masas. Lostie et al. (2002a) utilizaron la misma expresión para la conductividad térmica en el horneado de bizcochos y obtuvieron valores similares de estos parámetros.

Dada la similitud entre los valores obtenidos para los diferentes coeficientes de convección h_p , que regulaba el intercambio de calor con el aire en la superficie superior del panqueque, la magnitud de esta transmisión de calor es semejante en todos los modelos. Los valores predichos son del mismo orden de magnitud que los de otros modelos (Feyissa et al., 2011; Sanz-Serrano et al., 2017).

4.2.3.6 Verificación y validación del modelo

En la Figura IV- 58 se comparan los resultados experimentales con los predichos por el modelo para la evolución durante el cocinado de la temperatura superficial media de la superficie superior del panqueque. La predicción que el modelo está siempre dentro de la región de desviación estándar de los datos experimentales, (representada por el área gris en la Figura IV- 58), excepto en los 30 s iniciales. Al inicio del proceso de calentamiento, el modelo estableció un comportamiento no lineal en buena concordancia con lo observado en estudios previos (Cernela et al., 2015; Feyissa et al., 2011; Sanz-Serrano et al., 2017). La operación manual de la cámara infrarroja impidió el muestreo a altas frecuencias para capturar la evolución del calentamiento inicial. El modelo predice con mucha certeza la temperatura al final del proceso de cocción: la masa de harina de garbanzos presenta el valor más bajo (92 °C) y la masa de harina de espelta la más alta

(94,8 °C). Los resultados experimentales muestran que el valor más bajo en 240 s correspondió a la masa de harina de garbanzos con una temperatura de $89,6 \pm 2,5$ °C y la más alta la masa de harina de espelta con $91,6 \pm 2,4$ °C. En la Figura IV- 58 se presenta para cada masa el error cuadrático medio (RMSE) de la evolución de la temperatura entre los valores experimentales y los predichos por modelo. Este parámetro representa una medida de cómo de cerca están las temperaturas simuladas y las experimentales. Para todas las masas este error es igual o menor que 2,7 °C.

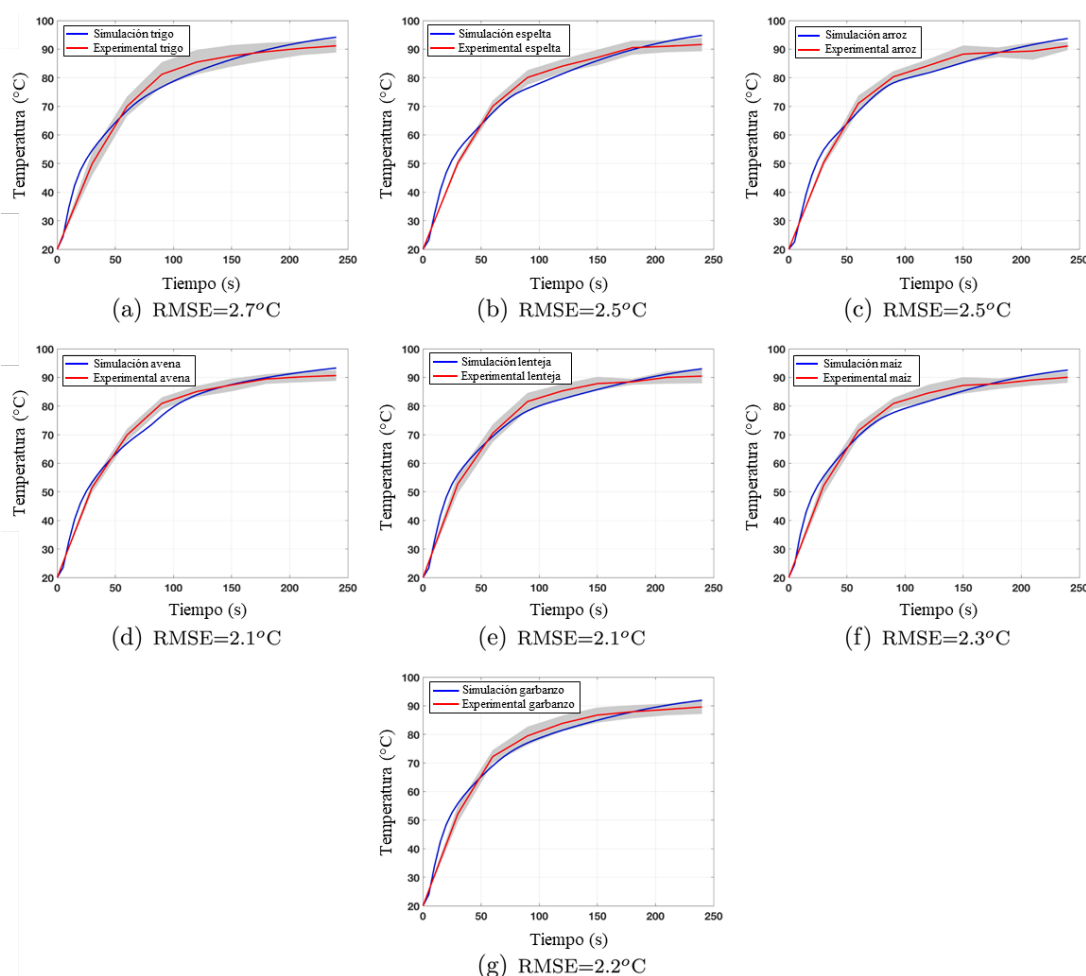


Figura IV- 4. Comparación entre la evolución de la temperatura promedio de la superficie superior de panqueque obtenida experimentalmente con la predicha por el modelo para masas elaboradas con diferentes harinas. Los errores cuadráticos medios (RMSE) se presentan debajo de cada gráfica.

Los resultados de la simulación de la pérdida de peso del panqueque durante el cocinado se presentan en la Figura IV- 59 junto con los datos experimentales. La mayor pérdida de peso en los resultados experimentales correspondió a la masa de harina de arroz ($21,3 \pm 1,0$ %), para lo cual el modelo predijo una disminución en el peso del 23,6 %. Tanto el modelo como los datos experimentales otorgan a la masa de harina de

avena la menor pérdida de peso, con unos valores finales de 10,8 % y de $9,7 \pm 0,4$ %, respectivamente. Todos los resultados del modelo mostraron la misma tendencia en la evolución de la pérdida de peso durante el proceso de calentamiento, prediciendo valores muy cercanos a los resultados experimentales. Como se observa cualitativamente, para algunas masas el modelo se aproxima más a los datos experimentales que para otros. Cuantitativamente, el RMSE entre los resultados experimentales y las predicciones del modelo muestra el valor más bajo para la masa de harina de lentejas (0,35 %) y el más alto para la harina de arroz (1,41 %). Una comparación con los datos disponibles en la literatura mostró resultados de pérdida de peso similares en el estudio llevado a cabo por Sanz-Serrano et al. (2017) para las masas de harina de trigo, y que cuando aumenta el grosor del panqueque la pérdida de peso disminuye (Cernela et al., 2015; Feyissa et al., 2011).

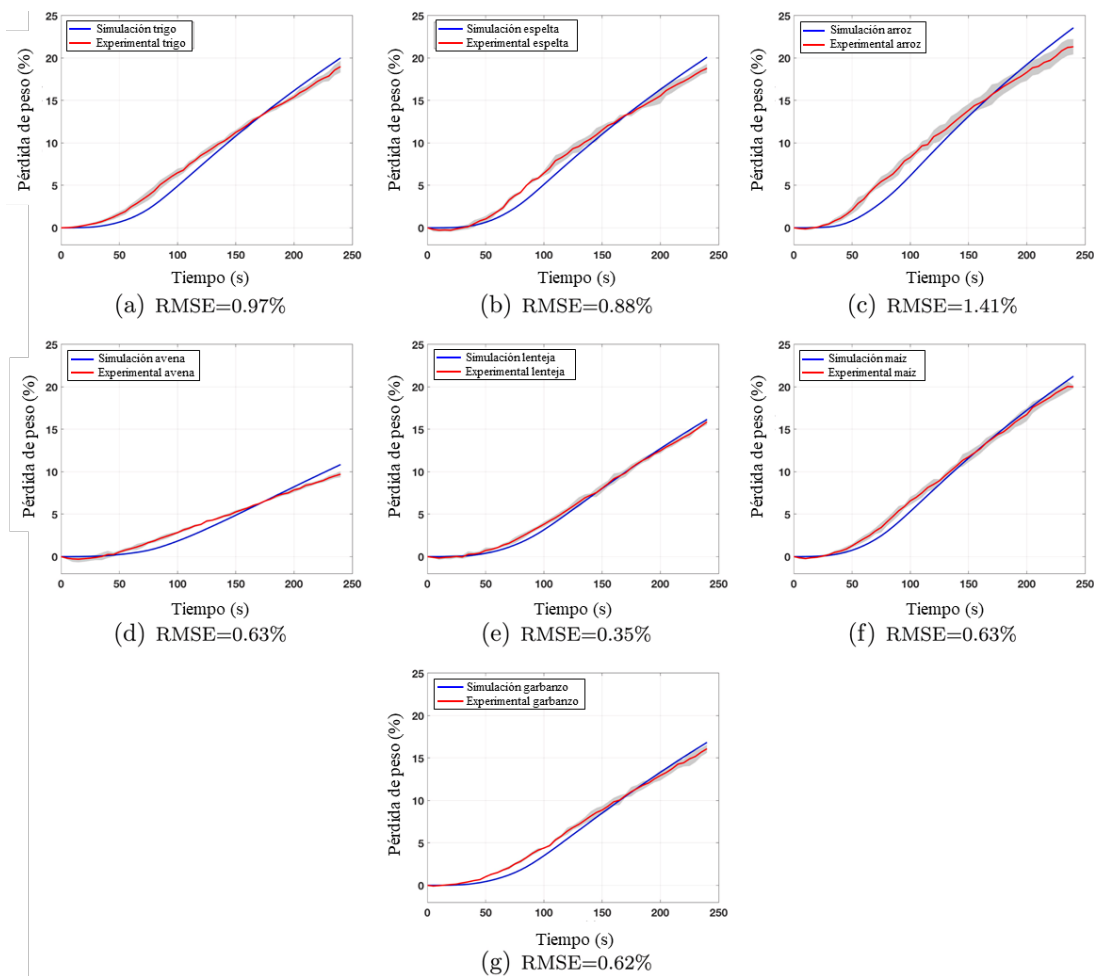


Figura IV- 5. Comparación entre la evolución de la pérdida de peso obtenida experimentalmente con la predicha por el modelo para masas elaboradas con diferentes harinas. Los errores cuadráticos medios (RMSE) se presentan debajo de cada gráfica.

4.3 CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE PASTA POR INMERSIÓN EN AGUA HIRVIENDO

Las condiciones de cocinado de la pasta pueden afectar a la calidad final del producto. Cuando la pasta se cocina por inmersión en agua hirviendo, la temperatura y el tiempo de cocción, la relación pasta:agua, el tipo de agua o de recipiente de cocción son, entre otras, variables a considerar (Murray et al., 2017). Por otra parte, la mayor parte de la energía que se requiere durante todo el ciclo de producción de la pasta, se consume durante el proceso de cocción (Cimini et al., 2019a). Los consumidores demandan que además de ser nutritivos y apetecibles, los alimentos cocinados sean también más sostenibles y con menor impacto medioambiental. Es por ello que se ha querido profundizar en dos estrategias que permitirían reducir el consumo de energía en el cocinado: la utilización de la mínima potencia para el calentamiento y de la máxima relación pasta:agua. Estas alternativas serían válidas siempre que no se viesan afectadas las propiedades organolépticas y nutricionales del producto final. Para analizar cómo la potencia suministrada y la cantidad de agua utilizada durante la cocción influyen en las propiedades de cocinado de la pasta, se realizó un estudio experimental con pasta de tres formas geométricas diferentes, ya que estudios previos indican que la desaparición del núcleo central no gelatinizado depende de la forma de la pasta, siendo más rápida en el espagueti que en el macarrón (Cafieri et al., 2008). Además, se quiso evaluar si la agitación al comienzo de la cocción modifica las propiedades de cocinado de la pasta puesto que esta acción es recomendada habitualmente por los fabricantes del producto.

Por otra parte, en el mercado actualmente existe una amplia diversidad de pastas con diferente composición (refinadas, integrales, sin gluten, enriquecidas nutricionalmente...). Esta oferta obedece a la necesidad de satisfacer los nuevos requerimientos de los consumidores que demandan dietas más saludables que incorporen mayores ingestas diarias de fibra dietética y productos enriquecidos con ingredientes para mejorar su valor nutricional o funcionalidad (Mercier et al., 2016). Además, en la últimas dos décadas ha aumentado la demanda de productos sin gluten por el incremento de personas que no pueden consumir gluten por razones médicas y por consumidores que eligen evitar el gluten por motivos personales (Woomer y Adedeji, 2021). Debido a estas

nuevas tendencias de consumo, se ha considerado oportuno incluir en este estudio la pasta integral y la pasta sin gluten.

4.3.1 Temperatura del agua de cocción

La cocción de la pasta se realizó a dos potencias. La inferior, que se denominará potencia 1 (P1), es la mínima potencia a la que se aprecia la formación de burbujas de vapor en el fondo de la olla, y corresponde con una potencia suministrada de 573,2 W y una velocidad de evaporación del agua de $0,19368 \pm 0,0002$ g/s. La superior, que se denominará potencia 2 (P2), es la máxima potencia que la placa de inducción podía suministrar sin que se activase la función *boost*, y corresponde a una potencia suministrada de 1290 W y una velocidad de evaporación del agua de $0,56442 \pm 0,0004$ g/s. La formación de burbujas en el fondo de la olla no indica que la temperatura del agua de cocción en su conjunto haya llegado a ebullición, sino que está asociada a la alta temperatura en la superficie de la olla y del agua en contacto con ella. Estas burbujas se desprenden del fondo y ascienden hacia la superficie del líquido, por lo que al usuario puede darle la impresión de que el líquido hierve, pero no es así. Experimentalmente se determinó la temperatura del agua de cocción (a 2,5 cm del fondo) y la temperatura en la superficie de la olla durante la cocción de la pasta a las dos potencias seleccionadas. En la Figura IV- 60 se muestran los resultados que se obtuvieron. El agua (1 L) se calentó utilizando la función *boost* hasta que alcanzó el punto de ebullición, posteriormente se redujo la potencia hasta el valor deseado y se incorporó la pasta (100 g). En todo momento el agua permaneció con borboteo, observándose un borboteo más débil a la potencia más baja. Los datos muestran que para la potencia inferior la temperatura del agua y en el fondo de la olla es 3 °C menor que para el nivel de potencia más alto. Cuando se cuece la pasta aplicando la potencia 1, la cocción se realiza a 96,9 °C, frente a los 99,8 °C de la potencia 2. También se observó que cuando se incorpora la pasta se produce un mayor descenso de la temperatura para el nivel más bajo de potencia. Estos resultados coinciden con los del trabajo de De la Peña et al. (2014) que registraron también la disminución repentina de la temperatura del agua cuando se agregaba la pasta al agua hirviendo. Esta disminución la explicaron por la ley de conducción de calor de Fourier, que establece que cuando existe un gradiente de temperatura dentro de un sistema, la energía térmica fluye desde la región de mayor temperatura a la de menor temperatura. Por lo tanto, la pasta que inicialmente está a temperatura ambiente, absorbió rápidamente el calor del agua

hirviendo. El calentamiento continuo restauró la energía absorbida por la pasta y dio como resultado un aumento posterior en la temperatura del agua.

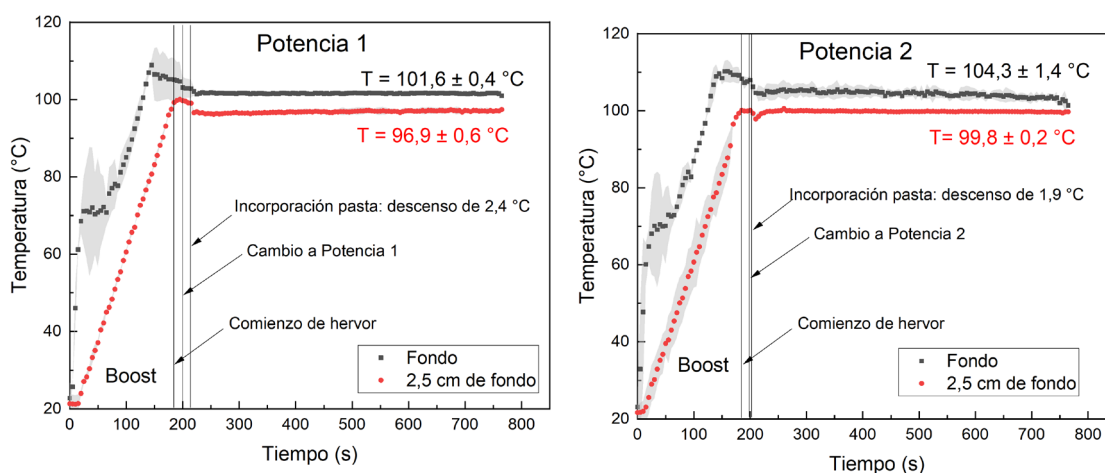


Figura IV- 6. Evolución de la temperatura en la superficie de la olla y a 2,5 cm del fondo durante la cocción de pasta a potencia 1 (izquierda) y a potencia 2 (derecha).

4.3.2 Tiempo óptimo de cocción (OCT)

El tiempo de cocción es un parámetro que está estrechamente vinculado a la calidad final del producto. Tanto es así, que la American Association of Cereal Chemists (AACC) establece un método estándar para la determinación del tiempo óptimo de cocción (OCT) de los espaguetis, que se describe en el método 66-50.01 (AACC, 1989). En ocasiones, se define como parámetro de calidad otro tiempo de cocción, diferente al óptimo, y que hace referencia al tiempo tolerado más allá del tiempo de cocción óptimo antes de que el producto pierda calidad (Murray et al., 2017).

Cuando la pasta se cocina, se pueden distinguir fácilmente dos zonas: una región hinchada en la superficie y un núcleo central blanco. A medida que avanza la cocción, la frontera entre ambas zonas se desplaza hacia el centro del producto y desaparece una vez que ha alcanzado el tiempo de cocción óptimo. El núcleo central blanco es el almidón que no ha gelatinizado durante la cocción. Al presionar la pasta suavemente entre dos placas de vidrio, tal y como describe el método 66-50.01, se establece el OCT como aquél en que desaparece ese núcleo central en la pasta cocida. En la Figura IV- 61 se muestra las imágenes de las placas de vidrio con las que se determinó el tiempo óptimo de cocción del espagueti. Para la potencia 1, el OCT resultó estar entre 9 min y 9 min 30 s, y para la potencia 2, el OCT fue en 9 min, coincidiendo con el tiempo que marca el fabricante de la pasta (Figura IV- 62). Por ello, se estableció que el tiempo de cocinado para los ensayos

de pasta sería el que recomienda el fabricante para cada tipo de pasta, tal y como suele ser habitual en los estudios llevados a cabo con pasta comercial (Cimini et al., 2019c; Cocci et al., 2008; Diantom et al., 2019). Estos tiempos fueron de 9 min para los espaguetis gruesos, y de 8 min para los espaguetis finos y para los macarrones.

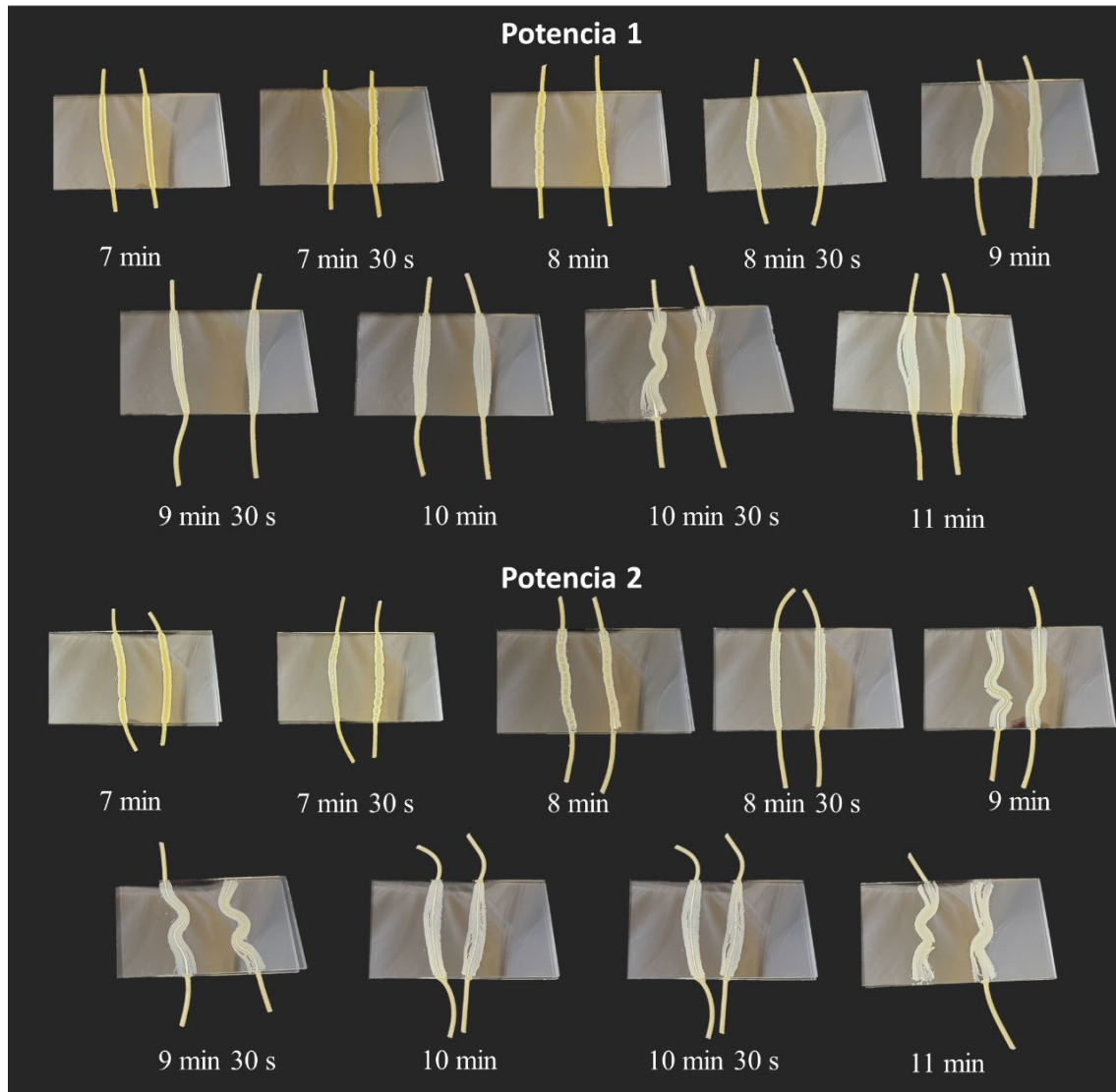


Figura IV- 7. Determinación de tiempo óptimo de cocción (OCT) para potencia 1 (baja) y potencia 2 (alta).

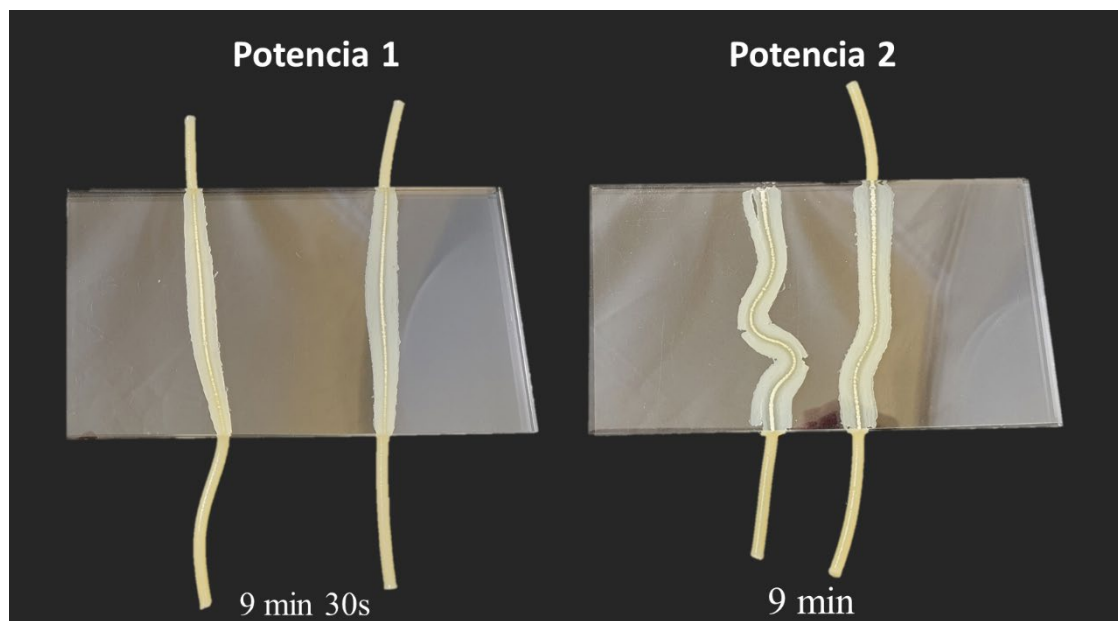


Figura IV- 8. *Tiempo óptimo de cocción (OCT) para potencia 1 (baja) y potencia 2 (alta).*

4.3.3 Influencia de la potencia en la calidad de la pasta

Con el propósito de caracterizar el cocinado de la pasta y evaluar cómo influye la potencia en la calidad del producto, se determinó la evolución de las propiedades de cocinado de la pasta y de la textura durante su cocción. Se planteó la hipótesis de que la diferencia en la temperatura del agua de cocción (3 °C) que hay entre las dos potencias (apartado 4.3.1), unida a la distinta fluidodinámica del medio, podían tener alguna repercusión en los fenómenos físico-químicos que tienen lugar durante el cocinado (absorción de agua, gelatinización del almidón, coagulación proteica, lixiviación de compuestos solubles, ...) y por lo tanto afectar a las propiedades de cocinado y a la calidad nutricional y sensorial de la pasta. Aunque la diferencia de temperatura es de poca magnitud, en trabajos anteriores del grupo de investigación se han observado cambios no despreciables en el valor nutricional de algunos alimentos al modificar tan sólo 5 °C la temperatura de cocción; por ejemplo, cocer el arroz a 95 °C en lugar de hacerlo a 100 °C redujo el índice glucémico en un 10 % (Guillen et al., 2018).

4.3.3.1 Evolución de las propiedades de cocinado de la pasta durante la cocción

Las pérdidas por cocción (CL) representan los sólidos lixiviados en el agua durante la cocción de la pasta. Se reconoce como una propiedad importante para la aceptación del consumidor, probablemente porque las pérdidas por cocción están

asociadas con la fuga de amilosa de los gránulos de almidón, lo que da como resultado una textura pegajosa desagradable (Mercier et al., 2016). Este parámetro se usa habitualmente para predecir la calidad de la pasta y un valor del 8% se considera un límite para la buena calidad de la pasta (Bustos et al., 2015).

En la Figura IV- 63 se muestra la evolución de las pérdidas por cocción de las tres pastas de semolina de trigo *durum* (espagueti fino de $1,61 \pm 0,01$ mm de diámetro, T1; espagueti grueso de $1,73 \pm 0,03$ mm de diámetro, T2; y macarrón) para las dos potencias de calentamiento. En todos los casos, las pérdidas por cocción aumentan casi linealmente con el tiempo. Los espaguetis finos presentan las mayores pérdidas por cocción mientras que los macarrones son los que lixivian menos cantidad de sólidos al agua. Cuando se cocinan las tres pastas a la máxima potencia se generan mayores pérdidas por cocción que cuando se hace a la mínima potencia. Esto puede ser debido a que con la potencia más alta hay mayor borboteo y por lo tanto mayor turbulencia en el agua de cocción, que puede ocasionar un mayor transporte de sustancias desde la superficie de la pasta hasta el agua de cocción. En ningún caso las pérdidas por cocción superaron el límite de calidad del 8%. Sin embargo, la influencia de la potencia en las pérdidas por cocción es de diferente magnitud en unas pastas que en otras. Para el caso del espagueti fino tan apenas influye la potencia en las pérdidas por cocción, pero para las otras dos pastas las diferencias son más importantes.

Los resultados obtenidos coinciden con los de otros trabajos. Cimini et al. (2019c) obtuvieron unas pérdidas por cocción del 4,2 %, a una potencia de 0,4 kW utilizando la misma relación pasta:agua y un tipo de espaguetis similar a los gruesos utilizados en este trabajo. Este valor es muy parecido a los 4,15 % y 3,81 % obtenidos en este estudio para el tiempo de cocción óptimo a la potencia alta y baja, respectivamente. Sin embargo, los resultados no son totalmente comparables puesto que estos autores cuecen la pasta con la olla tapada. En otro trabajo, Cimini et al. (2021) abordaron el efecto de la temperatura de cocción en la calidad y sostenibilidad de la pasta cocida. Realizaron su estudio con pasta de dos geometrías, espagueti y macarrón tipo ziti, y al igual que en nuestro caso, obtuvieron mayores pérdidas por cocción en el espagueti que en el macarrón. Sin embargo, no encontraron diferencias significativas en las pérdidas por cocción del macarrón cocinado a diferentes temperaturas mientras que para el espagueti sí. Espinosa-Solis et al. (2019) en espaguetis de semolina de trigo *durum*, de 1,5 mm de diámetro,

encontraron unas pérdidas de cocción de 3,57 %; valor éste similar al obtenido en nuestro caso para la potencia inferior, pero en su estudio no es específica la potencia suministrada durante la cocción.

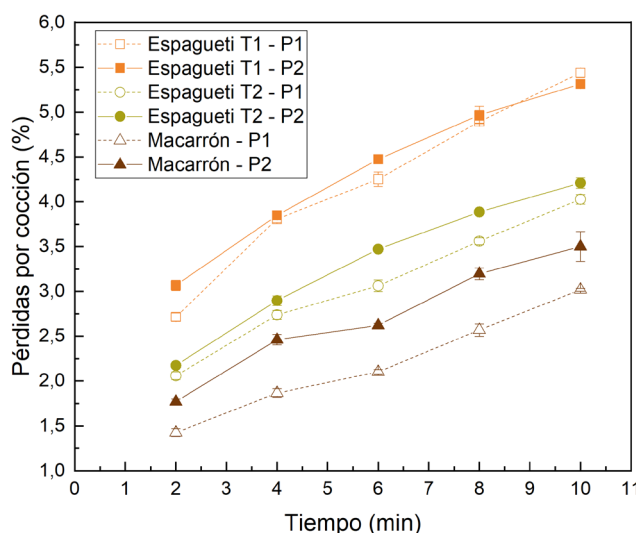


Figura IV- 9. Evolución de las pérdidas por cocción en tres tipos de pasta (espagueti fino, T1, espagueti grueso, T2, y macarrón) y para dos potencias (baja, P1, y alta, P2).

Varios autores han demostrado que la cantidad de residuo en el agua de cocción es un buen indicador de la textura de la pasta cocida ya que denota el grado de ruptura de la estructura durante el cocinado (Dexter et al., 1985; Matsuo y Irvine, 1970; Sung y Stone, 2003). Es por ello que, además de determinar las pérdidas por cocción, se analizó la turbidez del agua de cocción, ya que podría ser un indicador adicional de los cambios que se producen en la pasta durante la cocción.

En la Figura IV- 64 se muestra la evolución de la turbidez en el agua de cocción durante el cocinado de los tres tipos de pasta a las dos potencias. Se puede observar que, para un mismo tiempo de cocción y una misma potencia, la pasta que genera un agua más turbia es el espagueti fino, seguido del espagueti grueso, y por último el macarrón. En cuanto a la influencia de la potencia en la turbidez se puede concluir que, para las tres pastas, el agua es más turbia cuando se cocina a mayor potencia. Este resultado es lógico puesto que en la medida de la turbidez influye además de la cantidad de sustancias lixiviadas al medio de cocción, lo concentradas que éstas se encuentren. Como las pérdidas de agua por evaporación durante el cocinado son mayores a medida que aumenta la potencia, solamente este efecto origina un incremento de la turbidez, aunque la cantidad

de sólidos en el agua fuese la misma. Para el caso del espagueti T1 se observa cómo se estabiliza el valor de turbidez al final del cocinado. Eso puede ocurrir debido a que, al haber un aumento en los sólidos en el medio de cocción, la lixiviación de la pasta al agua de cocción se reduce, ya que se trata de la muestra más fina y por tanto, en la que se produce un mayor intercambio entre la pasta y agua de cocción que provoca una mayor concentración de estos sólidos. Son pocos los trabajos en los que valora la turbidez, destacando el de Zhou et al. (2007) que estudia el efecto de la temperatura de almacenamiento en la cocción del arroz y el de Jang et al. (2015) en el que se estudió la digestibilidad in vitro del almidón de fideos elaborados con diversas harinas de cereales e hidrocoloides. En ambos estudios evalúan la turbidez mediante espectrofotometría y además determinan las pérdidas por cocción, siguiendo ambos parámetros la misma tendencia, al igual que se aprecia en los resultados obtenidos en esta tesis doctoral (Figura IV- 63 y Figura IV- 64).

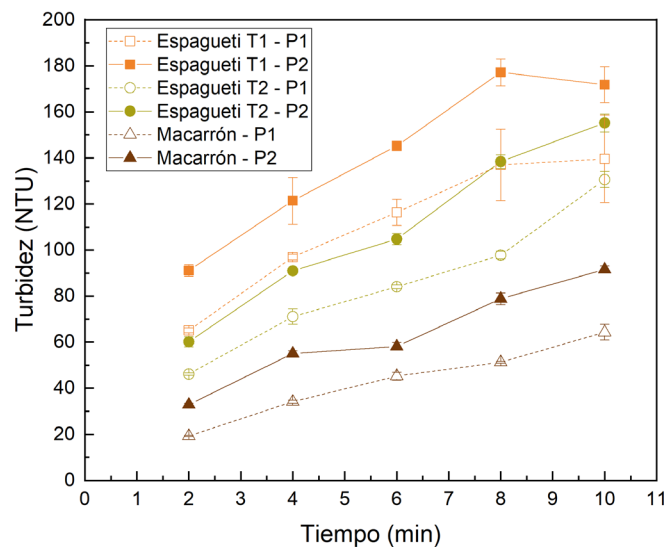


Figura IV- 10. Evolución de la turbidez en el agua de cocción en tres tipos de pasta (espagueti fino, T1, espagueti grueso, T2, y macarrón) y para dos potencias (baja, P1, y alta, P2).

Entre de los atributos de calidad de la pasta cocida, es necesario considerar el grado de gelatinización del almidón ya que afecta a la textura y a la digestibilidad de la pasta (Cimini et al., 2019c; Wootton y Chaudhry, 1980). En este trabajo también se determinó el grado de gelatinización de la pasta obtenido mediante la determinación colorimétrica del complejo almidón-yodo en muestras de pasta cocida. En la Figura IV- 65 se representa la evolución del grado de gelatinización para los tres tipos de pasta a las dos potencias ensayadas. Se puede observar que el grado de gelatinización aumenta

rápidamente durante los 6 primeros minutos y posteriormente muestra un incremento más paulatino. Para las tres pastas, a un tiempo dado, el grado de gelatinización es mayor cuando la pasta se cocinó con la potencia más alta que cuando lo hizo con la potencia mínima de burbujeo. Esta diferencia puede asociarse a la diferencia de temperatura que hay en el agua cuando se usa una potencia u otra, unida a un mayor movimiento del agua a alta potencia por la turbulencia del fuerte burbujeo que conllevan una gelatinización del almidón más intensa (Turgut et al., 2021). El mayor movimiento del agua a alta potencia favorece que la temperatura del agua sea más homogénea, que se minimicen los puntos fríos, un mayor acceso del agua al almidón y que la pasta no se adhiera entre sí. Respecto a la forma de la pasta, el espagueti con menor grosor (T1) presentó mayor grado de gelatinización, mientras que el espagueti fino (T2) y el macarrón presentaron valores similares.

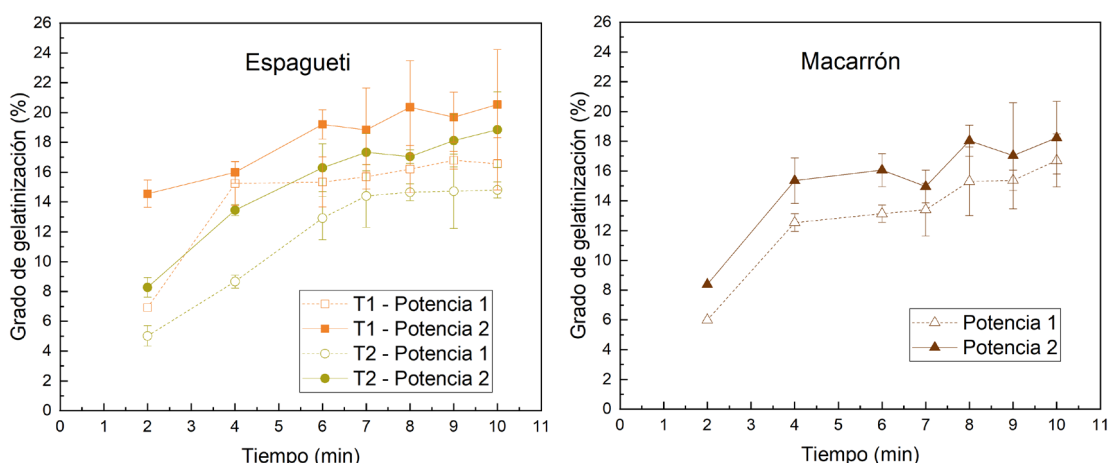


Figura IV- 11. Evolución del grado de gelatinización de la pasta durante la cocción de tres tipos de pasta y dos potencias (baja, P1, y alta, P2). Izqda.: espagueti fino (T1) y espagueti grueso (T2). Dcha.: macarrón.

Para el tiempo óptimo de cocción el espagueti fino (8 min) presentó un grado de gelatinización del 16,24 % y 20,36 % a baja y alta potencia, respectivamente; en el caso del espagueti grueso (9 min) estos valores fueron de 14,72 % y 18,12 % y para el macarrón (8 min) de 15,31 % y 18,04 % (Tabla IV- 23). En la bibliografía se han encontrado valores muy dispersos del grado de gelatinización. Algunos autores han obtenido valores inferiores a los aquí descritos, como es el caso del trabajo de Cimini et al. (2019c) en el que el grado de gelatinización está comprendido entre 9,8 y 12 % dependiendo de la relación pasta/agua, o entre 7,4 y 9,3 en el caso de macarrones estriados en función la composición del producto por tratarse de tres marcas comerciales distintas (Cimini et al.,

2019b). Cocci et al. (2008) obtuvieron un grado de gelatinización del 13% para espaguetis de la misma marca y del mismo diámetro que los aquí denominados gruesos (T2), pero cocinados durante 8 min en vez de durante 9 min como es nuestro caso. Sin embargo, Turgut et al. (2021) describen valores más elevados, de 23,37 % para pasta en forma de pajarita (*bow-tie pasta*) en cocción tradicional, y de 23,37-48,23 % para el cocinado por calentamiento óhmico, dependiendo del gradiente de voltaje aplicado. En ese estudio observaron que a medida que se incrementaba el gradiente de voltaje aumentaba el grado de gelatinización de forma significativa debido a que las muestras alcanzaban el punto de ebullición rápidamente a gradientes de voltajes mayores, mientras que, a gradientes bajos, la temperatura de cocción era menor haciendo que no progresara tan intensamente el grado de gelatinización del almidón.

La cocción de la pasta es un paso importante para obtener un producto final de calidad, puesto que una pasta seca de alta calidad puede dar como resultado una pasta cocida de mala calidad si el proceso de cocción es incorrecto (Cocci et al., 2008; Menger, 1979). La calidad de la pasta tras la cocción está determinada por la competencia por el agua entre los fenómenos de polimerización de las proteínas en una red continua y el hinchamiento del almidón con pérdidas de exudado durante la cocción. Por ello, el índice de hinchamiento, es un buen indicador de la integridad de la matriz proteínica que restringe la penetración del agua. La calidad de la pasta está relacionada con un índice de hinchamiento de aproximadamente 180 % (Bustos et al., 2015).

En la Figura IV- 66 se muestra la evolución del índice de hinchamiento durante el cocinado de los tres tipos de pasta con las dos potencias utilizadas. Hasta los 10 min de cocción el índice de hinchamiento aumentó de forma aproximadamente lineal. En cuanto a la influencia de la forma de la pasta en el hinchamiento se observa que, a un tiempo de cocción dado, el macarrón presenta menores valores de índice de hinchamiento que los espaguetis, y que entre los dos tipos de espaguetis hay poca diferencia. Para los tiempos óptimos de cocción, los índices de hinchamiento del macarrón fueron de 85,24 y 87,3 % para baja y alta potencia, respectivamente. Estos valores cambian a 137,83 y 143,31 % en espaguetis gruesos, y a 140,81 y 141,12 % en finos (Tabla IV- 23). Como puede observarse el índice de hinchamiento tan apenas se modifica con la potencia calefactora, tan solo lo hace al final de la cocción tomando valores más elevados cuando la potencia es alta. Para los tiempos óptimos de cocción, se apreciaron diferencias estadísticamente

significativas ($p < 0,05$) entre potencias en el macarrón y en el espagueti grueso, pero no para el espagueti fino.

En la bibliografía se ha encontrado diferencias en el índice de hinchamiento asociadas al incremento de sólidos solubles en el agua de cocción. El aumento del contenido en sólidos del agua de cocción que se produce al reutilizar el agua limitaría la transferencia eficiente de materia, lo que conduce a una menor hidratación y a un hinchamiento parcial de los gránulos de almidón al tiempo óptimo de cocción. Diamante et al. (2019) estudiaron el efecto de la cocción en continuo sobre las propiedades del agua de cocción y la calidad de la pasta. Para ello, cocieron hasta 12 tandas de pasta utilizando la misma agua de cocción, rellenando la olla con agua nueva sólo para compensar la cantidad evaporada. El índice de hinchamiento que obtuvieron en la primera tanda era mayor que el de nuestro estudio (195,2 %), pero hay que señalar que el tiempo de cocción era también más elevado (11 min) y los espaguetis más gruesos (2 mm de diámetro). El índice de hinchamiento y las pérdidas por cocción disminuían a medida que aumentaba el número de tandas que se habían cocinado sobre esa misma agua. Modificaciones de organización en los polímeros de almidón dentro del gránulo originaría a su vez una menor lixiviación de sólidos (Marti y Pagani, 2013). Sissons y Batey (2003) también concluyen que una menor hinchazón de los gránulos de almidón está relacionada con una menor tendencia a que los gránulos lixivien su contenido al líquido circundante. Los sólidos del agua de cocción actúan como una barrera física en la superficie del producto dificultando que las partículas se lixivien, y en consecuencia queden llenando los poros más pequeños de la red de gluten. Además, parte de los sólidos lixiviados de los gránulos pueden quedarse agregados a la red de proteínas restringiendo parcialmente el hinchamiento de los gránulos. Se cree que la amilosa actúa como un freno contra el hinchamiento y que los gránulos de almidón no se hinchan totalmente hasta que la amilosa no se ha lixiviado.

La absorción de agua se produce a través de la superficie de la pasta y tiene una repercusión en un cambio de volumen. Por lo tanto, se consideró adecuado realizar la normalización del índice de hinchamiento respecto a la relación área superficial/volumen, para comprobar si los valores coincidían en las tres pastas que difieren sólo en la forma (la composición es semejante como se muestra en la Tabla III- 7). La relación área superficial/pasta, para el caso del macarrón es $15,39 \text{ cm}^{-1}$, para el espagueti grueso

23,06 cm⁻¹ y 24,88 cm⁻¹ para el espagueti fino. En la gráfica de la derecha de la Figura IV- 66 se muestran los resultados de evolución del índice de hinchamiento con los valores normalizados respecto a la relación área superficial/volumen del espagueti grueso y se puede observar que para un mismo tiempo de cocción los valores son similares para las tres pastas. Según este resultado se podría establecer, para un tiempo de cocción dado, un índice de hinchamiento que puede servir como referencia independientemente de la forma de la pasta, siempre que se mantengan las condiciones de cocinado y la composición de la pasta.

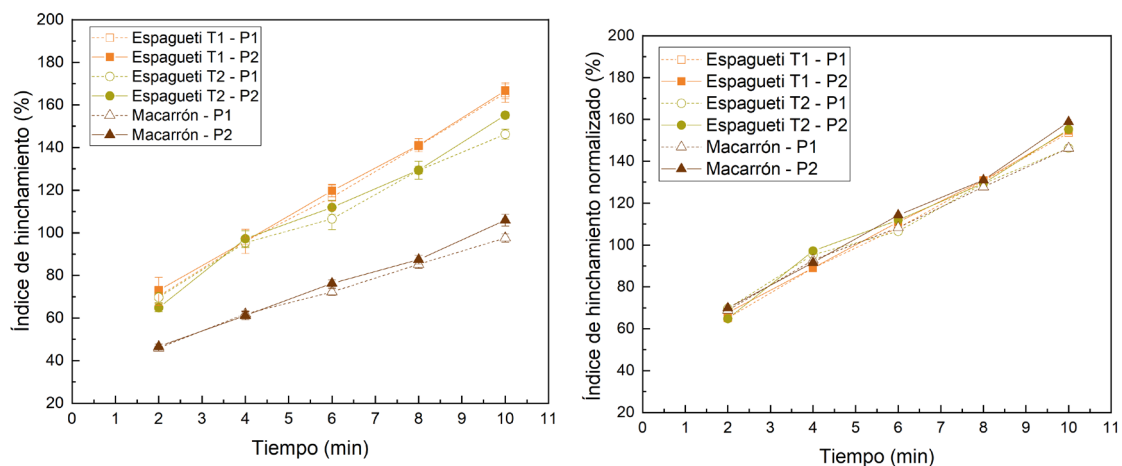


Figura IV- 12. Izqda.: Evolución del índice de hinchamiento durante la cocción de tres tipos de pasta (espagueti fino, T1, espagueti grueso, T2, y macarrón) a dos potencias (baja, P1, y alta, P2). Dcha: Valores normalizados con respecto a la relación área superficial/volumen del espagueti grueso.

Otro parámetro utilizado habitualmente para expresar los cambios en la pasta durante la cocción es el incremento de volumen que ésta experimenta y que obedece fundamentalmente a la absorción de agua y al consiguiente hinchamiento y gelatinización de los gránulos de almidón. En la Figura IV- 67 se muestra la evolución del incremento de volumen, expresado por unidad de masa inicial de pasta, para los tres tipos de pasta, a las dos potencias de calentamiento utilizadas. Como no podía ser de otra manera el incremento de volumen sigue la misma tendencia que el índice de hinchamiento aumentando con el tiempo de forma lineal para todos los casos. El macarrón es la pasta que menos se expande y el espagueti fino el que más. Cocinar a una potencia u otra los espaguetis finos hasta su tiempo óptimo de cocción no supone ningún cambio estadísticamente significativo en el incremento de volumen, que es de 1,19 mL/g para ambos casos. En el macarrón y en el espagueti grueso sí que hay diferencias significativas

($p < 0,05$) cuando se cambia la potencia calefactora (Tabla IV- 23). La expansión fue mayor cuando la cocción se realizó a la potencia más alta, con valores de 0,68 y 0,71 mL/g para el macarrón a baja y alta potencia, respectivamente, y de 1,06 y 1,14 mL/g para el espagueti grueso.

Otros autores obtuvieron también valores de incremento de volumen próximos a 1 mL/g. Savita et al. (2013) estudiaron la repercusión en la calidad al suplementar la pasta con proteínas de diferentes fuentes. Para la pasta control, elaborada con semolina de trigo, obtuvieron un incremento de volumen de 0,9 mL/g. Este valor aumentó cuando se sustituyó la semolina por harinas de diferentes leguminosas. Valores similares obtuvieron Kaur et al. (2013) en su trabajo de enriquecimiento de pastas con diferentes proteínas vegetales, donde la muestra control tuvo un incremento de volumen de 0,95 mL/g que también aumentó para mayores porcentajes de suplementación. Sin embargo, Surasani et al. (2019) realizó un estudio de las características de cocción de pastas suplementadas con aislado proteico de residuos de pangas, y para su muestra control elaborada con semolina de trigo obtuvo un incremento de volumen de 5,5 mL/g, valor mucho más elevado que los obtenidos en este trabajo. Además, el incremento de volumen aumentaba a medida que se incorporaba mayor porcentaje de proteína en la formulación del producto, coincidiendo en este aspecto con Kaur et al. (2013). Los valores anormalmente altos de las muestras control del trabajo de Surasani et al. (2019) pueden estar asociados al procedimiento de elaboración de las pastas y a la capacidad de retener agua de las proteínas de pescado, ya que en el resto de propiedades de cocinado también los resultados son diferentes con respecto a otros autores. Por ejemplo, las pérdidas por cocción son muy elevadas (15,40 %), superando el límite de calidad de la pasta que es del 8 %.

En la gráfica de la derecha de la Figura IV- 67 se muestran los resultados del incremento de volumen normalizados con respecto a la relación área superficial/volumen de igual manera a la descrita para el índice de hinchamiento. Los valores así obtenidos para los tres tipos de pasta se acercan entre sí, sin llegar a ser tan próximos como sucedía para el índice de hinchamiento.

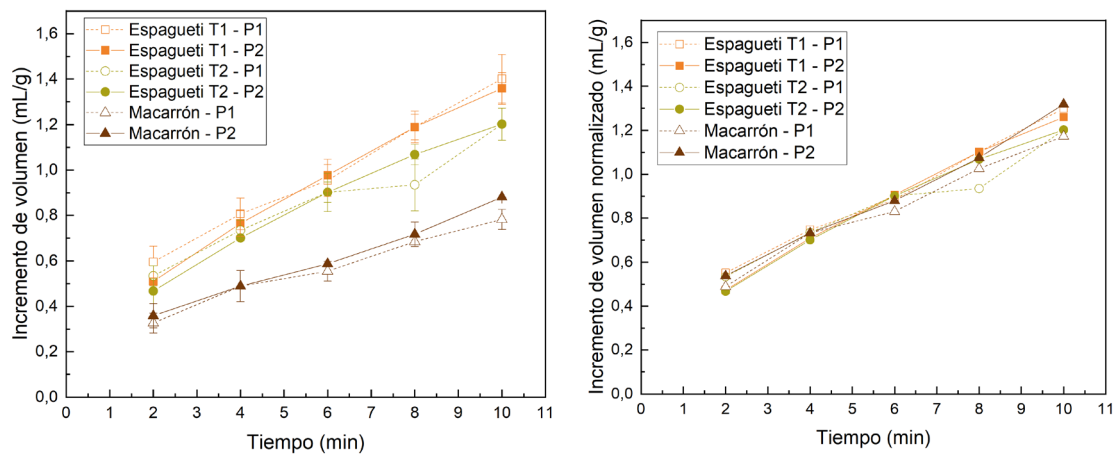


Figura IV- 13. Izqda.: Evolución del incremento de volumen durante la cocción de tres tipos de pasta (espaguetti fino, T1, espaguetti grueso, T2, y macarrón) a dos potencias (baja, P1, y alta, P2). Dcha: Valores normalizados con respecto a la relación área superficial/volumen del espaguetti grueso.

La cantidad de agua absorbida por la pasta durante el cocinado está asociada con el hinchamiento y la gelatinización del almidón y por la hidratación y coagulación de proteínas y se determina como el porcentaje de aumento de peso en relación con el de la pasta sin cocer. En la Figura IV- 68 se muestra la evolución del índice de absorción de agua durante el cocinado de las tres pastas a las dos potencias, incluyéndose también los valores normalizados con respecto a la relación área superficial/volumen. El índice de absorción de agua sigue el mismo patrón que el índice de hinchamiento y el incremento de volumen con la única salvedad de que se manifiestan más acusadamente las diferencias entre el espaguetti fino y el grueso.

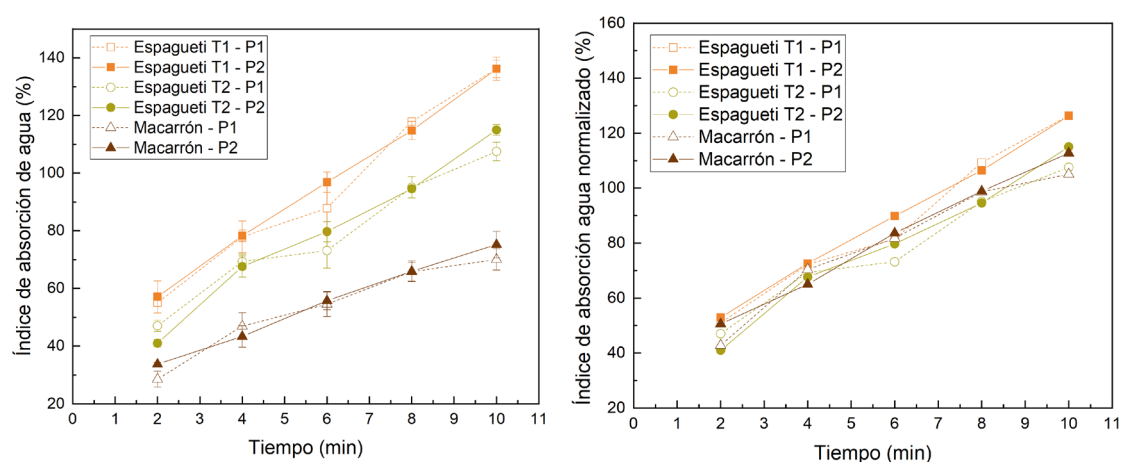


Figura IV- 14. Izqda.: Evolución del índice de absorción de agua durante la cocción de tres tipos de pasta (espaguetti fino, T1, espaguetti grueso, T2, y macarrón) a dos potencias (baja, P1, y alta, P2). Dcha: Valores normalizados del índice de hinchamiento con respecto a la relación área superficial/volumen del espaguetti grueso.

La absorción de agua parece no verse modificada por el hecho de cocinar la pasta con una potencia u otra salvo al final de la cocción. Estos resultados coinciden con los resultados del trabajo de Cimini et al. (2021) que concluyeron, después de varias pruebas de cocción para estudiar el efecto de la temperatura de cocción en la calidad de la pasta, que la absorción de agua de la pasta es independiente de la temperatura de cocción en el rango de 85 a 98 °C.

Para el tiempo óptimo de cocción (Tabla IV- 23), los índices de absorción de agua del macarrón fueron de 65,80 y 65,94 % para baja y alta potencia, respectivamente. Estos valores cambian a 101,66 y 104,58 % en espaguetis gruesos, y a 117,87 y 114,80 % en finos. Solamente en los espaguetis gruesos se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en el índice de absorción de agua entre potencias.

Al normalizar los resultados de los tres tipos de pasta con respecto a la relación área/volumen del espagueti grueso, se puede observar que las diferencias entre formas disminuyen, si bien los valores para el espagueti fino permanecen ligeramente superiores a los de las otras dos pastas.

Cafieri et al. (2008) propusieron un modelo para describir la cinética de hidratación de la pasta durante su cocción y lo implementaron en pastas de tres formas geométricas diferentes (lámina plana, cilindro macizo y cilindro hueco). Según este modelo el proceso de hidratación está gobernado por tres fenómenos: la difusión del agua, la relajación de la matriz macromolecular y la gelatinización del almidón. La difusión de agua la describieron mediante la ley de Fick de transferencia de materia, considerando que la difusividad del agua cambia de valor a partir de una cierta concentración de agua. La relajación de la matriz macromolecular se simplifica considerando como condición de contorno que la concentración de agua en la interfase varía linealmente con el tiempo y que la pasta no cambia de volumen. Además, consideran que la gelatinización del almidón es más rápida que la difusión de agua, y que por lo tanto esta última controla la cinética de hidratación, y que consecuentemente es razonable suponer que el almidón está totalmente gelatinizado cuando la concentración de agua llega a un determinado valor, que además coincide con aquél para el cual se produce el cambio en la difusividad del agua. En la Figura IV- 69 se muestra la comparación de los resultados de Cafieri et al. (2008) para pasta de forma cilíndrica con los obtenidos en este estudio para espagueti fino

y grueso a las dos potencias calefactoras. La absorción de agua predicha por el modelo de Cafieri et al. (2008) concuerda aceptablemente con los valores experimentales ya que está comprendida entre los valores experimentalmente obtenidos para los dos tamaños de espaguetis.

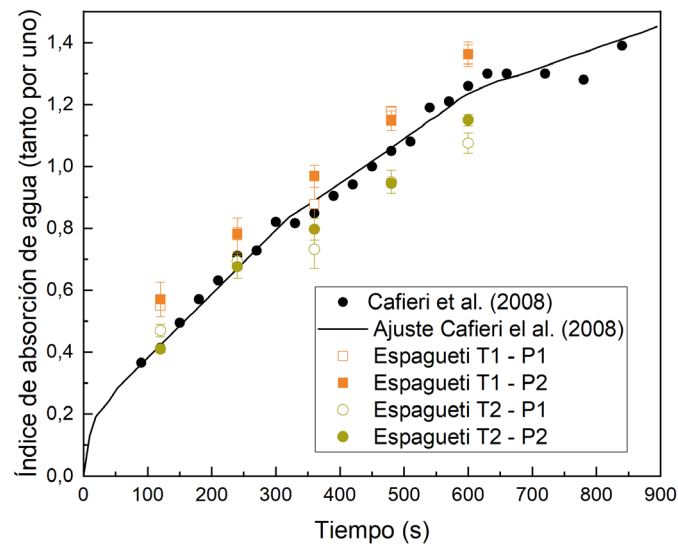


Figura IV- 15. Evolución de la absorción de agua durante el cocinado de espaguetis. Comparación de los datos experimentales para dos tamaños (fino, T1, y grueso, T2) cocinados a dos potencias (baja, P1, y alta, P2) con los valores experimentales y los predichos por el modelo de Cafieri et al. (2008).

Cocci et al. (2008) estudiaron la cinética de cocción de espaguetis cocidos con el método tradicional y con microondas. El tiempo óptimo de cocción de la pasta cocinada por el método tradicional fue el recomendado por el fabricante mientras que el tiempo óptimo de cocción de la pasta cocinada con microondas fue establecido mediante el parámetro de absorción de agua. Cuando los espaguetis cocinados con microondas alcanzaron la misma absorción de agua que los cocinados con el método tradicional se consideró que se había alcanzado el tiempo óptimo de cocción. El índice de absorción de agua de los espaguetis fue de 133 %, valor superior a los registrados en este estudio. Aunque estos autores utilizan el índice de absorción de agua como criterio para establecer el tiempo óptimo de cocción, esto es razonable hacerlo siempre que no cambie la forma de la pasta como es el caso, ya que se ha comprobado que la absorción de agua se modifica acusadamente con la relación área superficial/volumen de la pasta.

En la bibliografía se establecen valores límite del índice de absorción de agua para obtener una pasta de calidad. Dick y Youngs (1988) establecen que un valor adecuado de absorción de agua para el espagueti debe ser tres veces mayor al de su peso seco. Sin

embargo, Bustos et al. (2015) consideran que una absorción de 150-200g de agua/100g de pasta determinaría una calidad aceptable. Hay que tener en cuenta que en estudios más antiguos como el realizado por Dick y Youngs (1988) había tendencia a sobrecocer la pasta y por ello pueden resultar valores excesivamente altos para la tendencia actual que busca obtener una pasta al dente.

El incremento de volumen (VE) determinado como el desplazamiento del volumen de agua en una probeta al adicionar una determinada cantidad de pasta cocida menos el que se produce con la pasta sin cocer, y expresado por unidad de masa de pasta, es un parámetro que conlleva cierta imprecisión en su determinación, por eso los cambios de volumen que experimentó la pasta durante la cocción también se determinaron mediante análisis digital de imagen (ADI). En la literatura solo unos pocos estudios se han centrado en los cambios de las dimensiones que se producen en la pasta durante la cocción (Biernacka et al., 2019; Wójtowicz y Mościcki, 2014), pese a que estos cambios están relacionados directamente con otras propiedades de cocción de la pasta como el índice de absorción de agua o el índice de hinchamiento.

A partir de las imágenes tomadas con un escáner de los tres tipos de pasta se determinaron las dimensiones de la pasta en crudo (Tabla IV- 22) y a distintos tiempos de cocción para las dos potencias ensayadas. Conocidas las dimensiones se calculó el incremento de volumen expresado en tanto por ciento con respecto al volumen inicial (Figura IV- 70). Para ello se consideró geometría cilíndrica para los espaguetis y que el volumen del macarrón correspondía con el existente entre dos cilindros con la longitud y diámetros mostrados en la Tabla IV- 22.

Tabla IV- 22. Dimensiones iniciales de la pasta determinadas por ADI.

	<i>Longitud (mm)</i>	<i>Diámetro (mm)</i>		<i>Área (cm²/100g)</i>	<i>Volumen (cm³/100g)</i>
Espagueti T1	97,83±1,00	1,61±0,01		1700,05±14,27	68,34±0,77
Espagueti T2	100,3±0,74	1,73±0,03		1475,14±19,61	63,96±1,79
		Interior	Exterior		
Macarrón	34,39±1,66	4,89±0,09	7,49±0,09	1204,64±68,71	78,29±4,46

Al igual que sucedía para el índice de hinchamiento (SI) y para el incremento de volumen determinado por desplazamiento de líquido (VE), los mayores cambios de volumen se produjeron para el espagueti fino, mientras que el macarrón presentó los

menores, y en todos los casos se producía una expansión más acusada cuando se cocinaba a mayor potencia. Durante los primeros 2 primeros min de cocción se produjo un incremento muy rápido del volumen, de manera que aproximadamente la mitad del aumento de volumen que tiene lugar hasta el tiempo óptimo de cocción ocurre en ese intervalo de tiempo. Esta expansión rápida del volumen también la describen Biernacka et al. (2019) en espaguetis. Sus resultados revelaron que los mayores cambios del diámetro se daban en los primeros instantes de la cocción, y además propusieron una relación potencial para describir la variación del índice de crecimiento del diámetro con el tiempo, siendo dicho índice el cociente entre el diámetro a un tiempo dado y el diámetro inicial. El exponente variaba entre 0,170 y 0,548 dependiendo del tipo de pasta. Estos autores obtuvieron una correlación positiva estadísticamente significativa entre el índice de incremento del diámetro y el contenido en proteína de la pasta que explica una expansión más acusada de la pasta elaborada con harina de trigo común con respecto a la elaborada con harina de trigo *durum*.

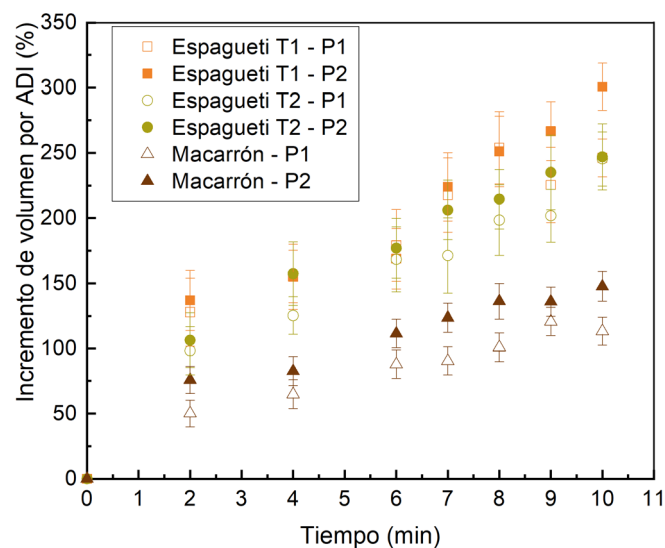


Figura IV- 16. Evolución del incremento de volumen determinado por ADI para los tres tipos de pasta (espagueti fino, T1, espagueti grueso, T2 y macarrón) a dos potencias (baja, P1 y alta, P2)

Puesto que otros autores como Kaur et al. (2013) y Savita et al. (2013) han obtenido una correlación significativa entre el incremento de volumen (VE) y el índice de absorción de agua de la pasta (WAI), se ha hecho una comparativa de la evolución del

volumen de la pasta calculado a partir de estos dos parámetros y del incremento de volumen determinado por ADI (Figura IV- 71).

(a)

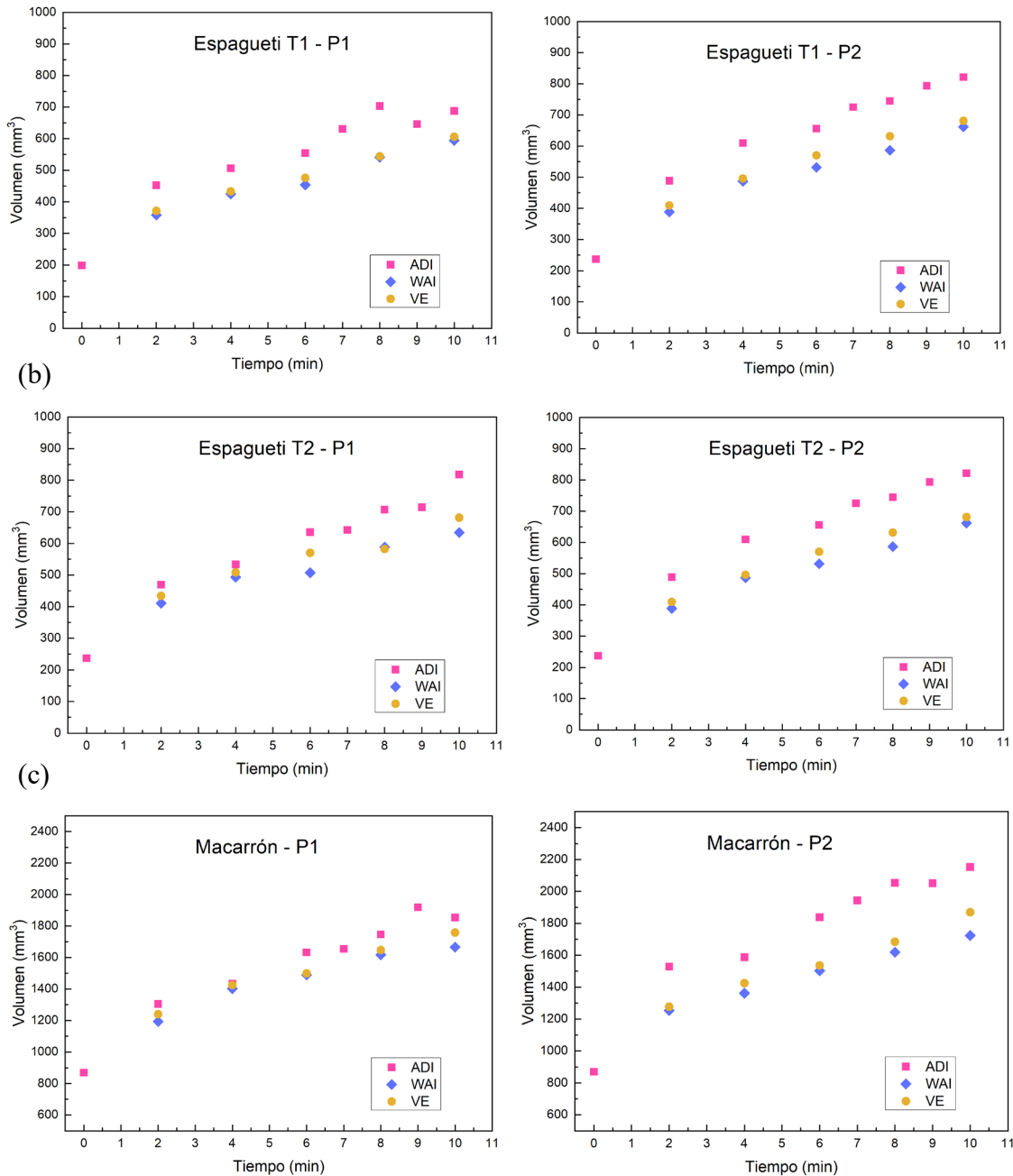


Figura IV- 17. Evolución del volumen de la pasta determinado a partir de análisis digital de imágenes (ADI), del índice de absorción de agua (WAI) y del incremento de volumen (VE): (a) espaguete fino, T1; (b) espaguete grueso, T2; y (c) macarrón. Izqda.: a baja potencia (P1), Dcha.: a alta potencia (P2).

Se puede observar que se obtienen prácticamente los mismos volúmenes con los datos del incremento de volumen, VE, que con los del índice de absorción de agua, WAI, en concordancia con estos autores. Sin embargo, partiendo de las medidas determinadas

mediante análisis digital de imagen, los volúmenes de la pasta son mayores que con los otros dos parámetros utilizados. Esto puede ser debido a que, al procesar la imagen de la sección de la pasta cortada perpendicularmente al eje longitudinal, se incluya parte de la superficie lateral de la pasta por no estar colocada totalmente perpendicular al escáner o por haber dejado de ser un cilindro perfecto, lo que puede conllevar una sobreestimación del volumen de la pasta. Otra explicación es que no todo el incremento de volumen sea debido al agua captada, y que la disrupción de la estructura proteínica y captación de agua por las proteínas conlleve una expansión adicional. En este segundo supuesto también tendríamos que haber obtenido mayores medidas en el parámetro VE, pero esta determinación analítica tiene cierta imprecisión.

4.3.3.2 Evolución de la textura de la pasta durante la cocción

Una pasta de calidad en términos de textura se suele definir como aquella que presenta una alta firmeza y baja pegajosidad, a lo que hay que añadir unas bajas pérdidas por cocción (D'Egidio y Nardi, 1996). La textura de la pasta es el resultado de varios fenómenos simultáneos como la solvatación progresiva, la polimerización de las proteínas, la gelatinización del almidón y la interacción entre biopolímeros, entre otros (Bonomi et al., 2012). El que la pasta tenga la textura deseada depende de que lleve a cabo su cocción hasta el tiempo óptimo, por lo tanto, es necesario conocer cómo cambia la textura de la pasta con el tiempo de cocción. En la Figura IV- 72 se muestra la evolución de la firmeza y de la pegajosidad para los tres tipos de pasta y las dos potencias ensayadas, determinadas a partir de test de corte y compresión, respectivamente. La firmeza de la pasta desciende acusadamente durante los 6 primeros minutos, y a partir de ese momento, los valores permanecen sin grandes cambios. La pegajosidad sigue una tendencia similar, donde en los primeros minutos se produce una gran disminución para luego estabilizarse. La evolución de la firmeza de la pasta es similar a la descrita por De la Peña et al. (2015) en su estudio de los cambios fisicoquímicos en pastas durante la cocción, en el que señalaron que la firmeza de las pastas disminuyó en los primeros minutos de cocción y luego se modificó a un ritmo mucho más lento.

La potencia suministrada durante la cocción no tuvo apenas influencia en la firmeza de los espaguetis finos, tal y como lo reflejan los valores para el tiempo de cocción óptimo (3,14 N y 2,99 N para la potencia baja y alta, respectivamente) (Tabla IV-

23). Las diferencias en la firmeza al variar la potencia se incrementaron ligeramente para los espaguetis gruesos, de modo que eran más firmes si se cocinaban a menor potencia (3,25 N frente a 2,96 N), pasando a ser muy evidentes en el macarrón (26 N frente a 22,57 N). No tiene sentido comparar los valores de firmeza entre pastas ya que el resultado está muy influenciado por el grosor y morfología de las muestras (Sissons et al., 2008b). Tanto es así que, por ejemplo, el macarrón tiene una firmeza 4 veces mayor que los espaguetis a los 2 min, sin que eso signifique nada más allá de los cambios en la textura por la diferente forma de ambas pastas. La pasta cocinada con una temperatura ligeramente inferior y con poco burbujeo además de ser más firme era también menos pegajosa, aunque la influencia de la potencia en la pegajosidad no fue igual en los tres tipos de pasta (Tabla IV- 23). Apenas cambió la pegajosidad del espagueti grueso al variar la potencia (4,97 N frente a 5,34 N), pero sí que lo hizo en el macarrón (2,78 N frente a 3,27 N) y sobre todo en el espagueti fino (3,39 N frente a 5,82 N).

Los valores de firmeza y pegajosidad de los espaguetis obtenidos guardan concordancia con los de Cocci et al. (2008) que obtuvieron una firmeza de 3,39 N y una pegajosidad de 3,76 N para espaguetis de semolina de trigo *durum* con un diámetro de 1,7 mm, y para una relación pasta/agua igual a la aquí utilizada 1:10 (g/mL). Diamante et al. (2019) obtuvieron valores de firmeza de espaguetis de 2 mm de diámetro próximos a los de este trabajo (2,7 N), sin embargo, los valores de pegajosidad fueron menores (1,8 N), lo cual puede ser debido a que estos autores prolongan la cocción hasta los 11 min.

Según los resultados obtenidos, las pastas cocinadas a baja potencia liberan menor cantidad de sustancias al agua de cocción (Figura IV- 63) y eran menos pegajosas (Figura IV- 72), confirmando la relación entre la pegajosidad y las pérdidas por cocción previamente planteada por otros autores (Majzoobi et al., 2011; Matsuo et al., 1992).

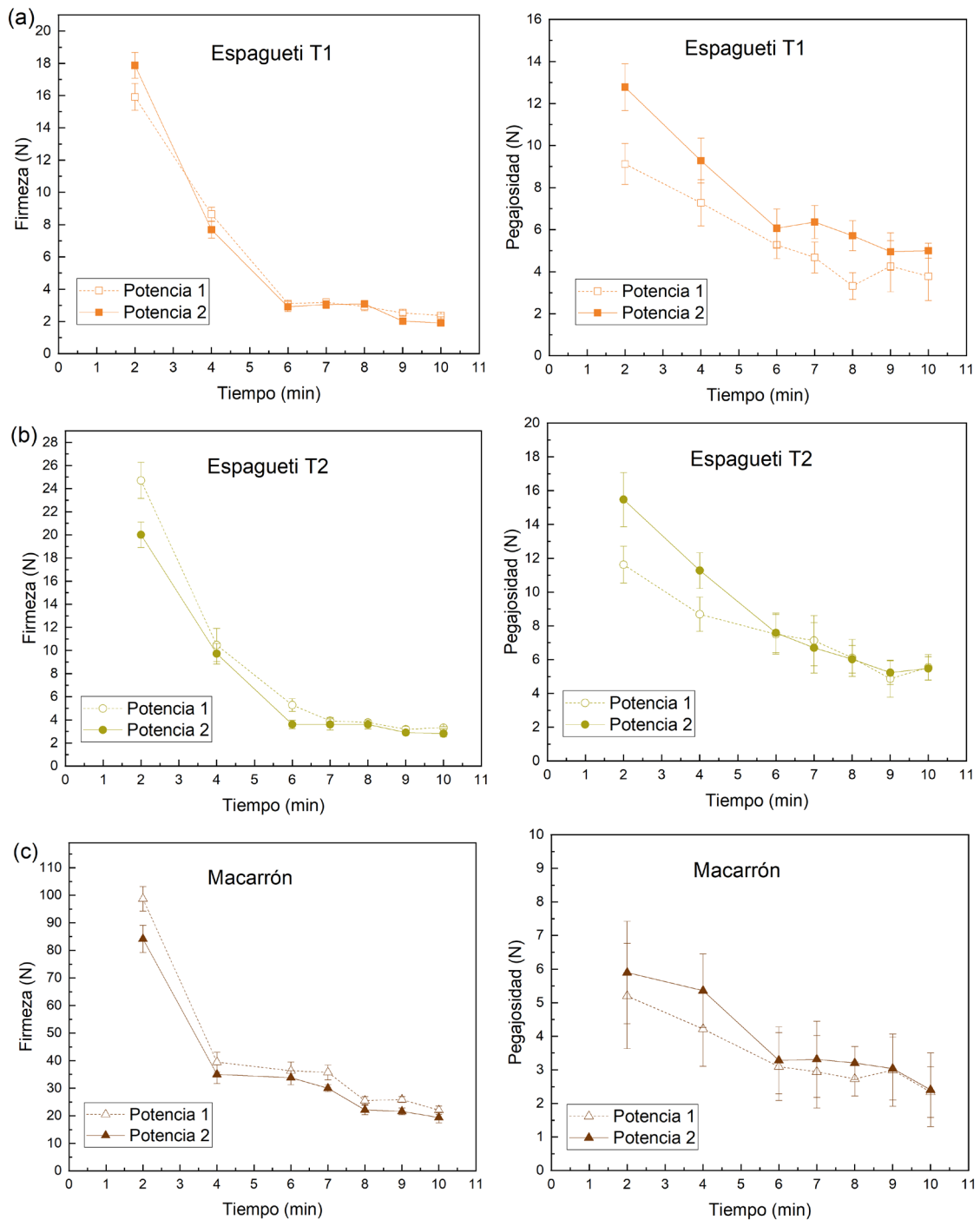


Figura IV- 18. Evolución de la firmeza (izqda.) y de la pegajosidad (dcha.) durante el cocinado de: (a) espagueti fino, T1; (b) espagueti grueso, T2; y (c) macarrón, para las potencias baja (potencia 1) y alta, (potencia 2).

4.3.3.3 Parámetros de calidad de la pasta al tiempo óptimo de cocción

Para evaluar la influencia de la potencia suministrada en las propiedades de cocción y en la textura de la pasta es importante comparar los resultados cuando la pasta se ha cocinado hasta su tiempo óptimo, ya que si el consumidor sigue las instrucciones

del fabricante de la pasta la cocinará hasta el tiempo recomendado. En la Tabla IV- 23 se muestran las propiedades de cocinado y la textura de los espaguetis finos y de los macarrones cocinados hasta los 8 min, y de los espaguetis gruesos cocinados hasta los 9 min, para la potencia máxima del equipo (potencia 2) y para la potencia de mínimo hervor (potencia 1).

La vigorosidad de la ebullición y la diferente temperatura del agua de cocción influyeron en las propiedades de la pasta cocida a diferentes potencias. Con una baja potencia, las pérdidas por cocción (CL), la turbidez (T) y la gelatinización del almidón (G) fueron significativamente ($p<0,05$) menores que con alta potencia, y la pasta era más firme (F) y menos pegajosa (P). Reducir la potencia también supone una menor expansión de la pasta que se manifiesta en un menor índice de hinchamiento (SI) y en un incremento de volumen más bajo (VE).

Tabla IV- 23. Propiedades de cocinado y textura de los tres tipos de pasta al tiempo de cocción óptimo (9 min para espaguetis gruesos, T2, y 8 min para espaguetis finos, T1, y macarrones) para las dos potencias (baja, potencia 1 y alta, potencia 2).

Parámetros	Espagueti T1		Espagueti T2		Macarrón	
	Potencia 1	Potencia 2	Potencia 1	Potencia 2	Potencia 1	Potencia 2
SI (%)	140,81 ±1,04a	141,12 ±3,11a	137,83 ±1,21a	143,31 ±1,68b	85,24 ±2,01a	87,39 ±2,06b
WAI (%)	117,87 ±2,29a	114,80 ±3,14a	101,66 ±1,37a	104,58 ±1,94b	65,80 ±3,22a	65,94 ±3,56a
VE (mL/g)	1,19 ±0,07a	1,19 ±0,06a	1,06 ±0,08a	1,14 ±0,04b	0,68 ±0,01a	0,71 ±0,03b
CL (%)	4,89 ±0,01a	4,97 ±0,10a	3,81 ±0,03a	4,15 ±0,04b	2,57 ±0,07a	3,20 ±0,07b
T (NTU)	137,00 ±15,49a	177,20 ±5,89b	115,25 ±1,00a	145,52 ±1,10b	51,28 ±0,40a	78,86 ±2,54b
G (%)	16,21 ±1,58a	20,36 ±3,13b	14,72 ±1,50a	18,12 ±1,76b	15,31 ±2,30a	18,04 ±1,04b
F (N)	3,14 ±0,19b	2,99 ±0,28a	3,25 ±0,24b	2,96 ±0,19a	26,00 ±3,58b	22,57 ±1,75a
TC (N·cm)	0,28 ±0,01b	0,25 ±0,02a	0,39 ±0,02a	0,38 ±0,02a	7,72 ±0,64b	7,09 ±0,59a
P (N)	3,39 ±0,65a	5,82 ±0,73b	4,97 ±1,11a	5,34 ±0,72b	2,78 ±0,52a	3,27 ±1,52b
TA (N·s)	0,16 ±0,06a	0,27 ±0,11b	0,26 ±0,07a	0,27 ±0,10a	0,70 ±0,24b	0,64 ±0,21a

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p<0,05$) entre potencias para un mismo tipo de pasta. SI (Índice de hinchamiento); WAI (Índice de absorción de agua); VE (Incremento de volumen); CL (Pérdidas por cocción); T (Turbidez); G (Grado de gelatinización); F (Firmeza); TC (Trabajo de corte); P (Pegajosidad); TA (Trabajo de Adhesión).

4.3.4 Influencia en la relación pasta:agua en la calidad de la pasta

En la literatura existen una amplia variedad de proporciones de pasta:agua (g/mL) que van desde 1:5 (Walsh, 1971) a 1:31 (Grzybowski y Donnelly, 1979) ó 1:50 (Oh et al., 1983). El valor más común y recomendado por los fabricantes de pasta es de 1:10 (Biernacka et al., 2021; D'Egidio et al., 1982; De Pilli et al., 2009; Matsuo y Irvine, 1969;

Surasani et al., 2019; Turgut et al., 2021), mientras que el método Internacional (AACC, 1989; Diamante et al., 2019) sugiere usar 1:12. A pesar de que la mayoría de fabricantes recomienda la relación 1:10 tal proporción parece excesiva para algunos autores, sobre todo si se pretende reducir el consumo energético del proceso de cocción de la pasta y hacerlo más sostenible (Cimini et al., 2019a). En este estudio se quiso comprobar el efecto que sobre las propiedades de cocinado y la textura de la pasta tiene reducir la relación pasta:agua de 1:10 a 1:6 (g/mL). La relación 1:6 se seleccionó porque era la menor relación que aseguraba que hubiese agua disponible para la hidratación de la pasta durante toda la cocción.

En la Tabla IV- 24 se muestran para las dos potencias ensayadas las propiedades de cocinado y de textura del espagueti grueso a su tiempo óptimo de cocción (9 min). Para la cocción a baja potencia (P1) no existen diferencias significativas entre las dos relaciones pasta:agua en los parámetros de calidad de la pasta que se han analizado, con la excepción de la turbidez del agua de cocción. Cuando se utilizó menor cantidad de agua, ésta era más turbia al final de la cocción. Este resultado era de esperar dado que los compuestos lixiviados al agua de cocción estaban en este caso más concentrados.

A alta potencia (P2) los resultados son diferentes. Al reducir la cantidad de agua, el índice de hinchamiento (SI), el incremento de volumen (VE) y las pérdidas por cocción (CL) fueron menores, mientras que la turbidez aumentaba. Estos resultados coinciden con los de Cimini et al. (2019c) y lo justifican por la mayor probabilidad de que los espaguetis se unan longitudinalmente entre sí cuando hay menor cantidad de agua y, por lo tanto, se reduce la superficie de la pasta expuesta al agua, lo que limita a su vez la cinética de rehidratación de la pasta y las pérdidas de compuestos al agua de cocción. Además, una mayor concentración de sustancias en el agua de cocción actúa negativamente en la lixiviación de componentes. De la Peña et al. (2014) evaluaron cómo afectaba la relación pasta:agua en las propiedades de cocción y también observaron que cuanto mayor era la cantidad de pasta que se cocinaba en misma cantidad de agua menores eran las pérdidas por cocción.

Se ha comentado anteriormente que existe una relación entre las pérdidas por cocción y la pegajosidad (P), ya que las pérdidas por cocción están asociadas con la liberación de la amilosa que da como resultado una textura más pegajosa y con peor

calidad (Mercier et al., 2016). Sin embargo, los espaguetis cocinados con menor cantidad de agua, a alta potencia, no eran menos pegajosos, aunque sus pérdidas por cocción habían sido menores. Fueron los espaguetis cocinados a baja potencia los que presentaron una mayor pegajosidad, pese a que en este caso no se habían modificado las pérdidas por cocción. Esto puede deberse a que cuando se cuece con un burbujeo muy lento, los compuestos que se transfieren al agua de cocción quedan retenidos en la superficie de la pasta, al aumentar la potencia, la alta turbulencia facilita el arrastre de estos compuestos hacia el agua de cocción.

Las diferencias en los parámetros de calidad observadas en los espaguetis cuando se cocinaban con distinta potencia utilizando una relación pasta:agua de 1:10 (g/mL), no se aprecian cuando se reduce la relación pasta:agua a 1:6. En este caso, la turbidez es el único parámetro que aumenta con la potencia. Esto puede ser debido a que con una relación 1:10 tenemos más agua disponible y puede tener mayor influencia la intensidad del borboteo del agua, mientras que una relación pasta:agua más reducida no se ve tan influenciado por la potencia al tener menor cantidad de agua y por lo tanto no tener tanto espacio para que se considere la influencia del borboteo.

Tabla IV- 24. Parámetros de calidad de los espaguetis gruesos a su tiempo óptimo de cocción (9 min) para dos relaciones pasta/agua (1:6 y 1:10 g/mL) y dos potencias (baja, P1 y alta, P2).

Espagueti T2	Potencia P1		Potencia P2	
	1:6 (g/mL)	1:10 (g/mL)	1:6 (g/mL)	1:10 (g/mL)
SI (%)	135,55 ±3,54 a,A	137,83 ±1,21 a,A	138,10 ±2,69 a,A	143,31 ±1,68 b,B
WAI (%)	104,72 ±3,27 a,A	101,66 ±1,37 a,A	106,81 ±1,69 a,A	104,58 ±1,94 a,B
VE (mL/g)	1,08 ±0,04 a,A	1,06 ±0,08 a,A	1,10 ±0,00 a,A	1,14 ±0,04 b,B
CL (%)	3,74 ±0,07 a,A	3,81 ±0,03 a,A	3,78 ±0,17 a,A	4,15 ±0,04 b,B
T (NTU)	201,40 ±5,86 a,A	115,25 ±1,00 b,A	297,20 ±9,34 a,B	145,52 ±1,10 b,B
P (N)	5,80 ±0,67 a,A	4,97 ±1,11 b,A	5,39 ±0,55 a,A	5,34 ±0,72 a,B

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p<0,05$) entre las relaciones pasta:agua para una misma potencia. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p<0,05$) entre potencias para una misma relación pasta:agua.

En la Tabla IV- 25 se muestran los resultados de las propiedades de cocinado y de textura del macarrón para la relación pasta:agua de 1:6 y de 1:10 (g/mL), cuando se cocinó hasta su tiempo óptimo (8 min) a dos potencias diferentes. Para las dos potencias, al reducir la cantidad de agua se produjeron menores pérdidas por cocción y un aumento de la turbidez porque, aunque la cantidad de sustancias lixiviadas es menor lo es también el volumen de líquido en el que se concentran. Estos dos parámetros también se modificaron

en el espagueti al variar la relación pasta:agua, aunque en ese caso también se apreciaron cambios en el índice de hinchamiento que no se observaron en el macarrón. Los macarrones cocinados con menos cantidad de agua tuvieron una pegajosidad más elevada, pero los valores no llegaron a ser estadísticamente diferentes ($p>0,05$).

Al igual que ocurría para una relación pasta/agua de 1:10 (g/mL) cuando se modificaba la potencia, sucede cuando la relación es 1:6 (g/mL). Los macarrones se tornan menos pegajosos, con un menor índice de hinchamiento y se reducen las pérdidas por cocción y la turbidez cuando se cuecen a baja potencia.

Tabla IV- 25. Parámetros de calidad de los macarrones a su tiempo óptimo de cocción (8 min) para dos relaciones pasta/agua (1:6 y 1:10 g/mL) y dos potencias (baja, P1 y alta, P2).

Macarrón	Potencia P1		Potencia P2	
	1:6 (g/mL)	1:10 (g/mL)	1:6 (g/mL)	1:10 (g/mL)
SI (%)	86,04 $\pm$ 1,43 a,A	85,24 $\pm$ 2,01 a,A	88,95 $\pm$ 0,74 a,B	87,39 $\pm$ 2,06 a,B
WAI (%)	64,21 $\pm$ 1,76 a,A	65,80 $\pm$ 3,22 a,A	64,39 $\pm$ 5,76 a,A	65,94 $\pm$ 3,56 a,A
VE (mL/g)	0,72 $\pm$ 0,05 a,A	0,68 $\pm$ 0,01 a,A	0,70 $\pm$ 0,04 a,A	0,71 $\pm$ 0,06 a,B
CL (%)	2,47 $\pm$ 0,03 a,A	2,57 $\pm$ 0,07 b,A	2,84 $\pm$ 0,03 a,B	3,20 $\pm$ 0,07 b,B
T (NTU)	77,48 $\pm$ 4,39 a,A	51,28 $\pm$ 0,40 b,A	174,00 $\pm$ 7,35 a,B	78,86 $\pm$ 2,54 b,B
P (N)	3,11 $\pm$ 0,56 a,A	2,78 $\pm$ 0,52 a,A	4,15 $\pm$ 0,56 a,B	3,27 $\pm$ 1,52 b,B

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p<0,05$) entre las relaciones pasta:agua para una misma potencia. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p<0,05$) entre potencias para una misma relación pasta:agua.

Se podría decir que es posible minimizar el consumo energético cocinando a baja potencia (potencia 1) y disminuyendo la relación pasta:agua (100g:600 mL) sin que se produzca una pérdida significativa en la calidad del producto.

4.3.5 Influencia de la agitación en la calidad de la pasta

Una de las recomendaciones de los fabricantes de pasta es agitar durante el primer minuto tras adicionar la pasta, esta recomendación se quiso evaluar para comprobar si el cocinar con agitación modifica las propiedades de cocinado de la pasta.

En la Tabla IV- 26 se muestran los resultados de las propiedades de cocinado del espagueti fino T1, del espagueti grueso T2, y del macarrón, con agitación o sin agitación cocinados a dos potencias hasta su tiempo óptimo de cocción. Para todas las pastas se obtienen mayores valores de turbidez ($p<0,05$) cuando se agita la pasta durante el primer minuto de cocción. Además, la agitación influyó en las pérdidas por cocción de manera

desigual según el tipo de pasta. En el macarrón las pérdidas por cocción aumentaron en cocción con agitación para las dos potencias, mientras que en el espagueti grueso solo aumentaron las pérdidas al agitar cuando la potencia era baja. Para el espagueti fino no se observó influencia de la agitación en las pérdidas por cocción. Una posible explicación a estos resultados es que los macarrones se quedan más pegados al fondo de la olla que las otras pastas, porque un macarrón tiene mayor peso que un espagueti y las burbujas de agua en el borboteo tienen más dificultad en mantenerlos en suspensión. Por lo tanto, el efecto de la agitación tiene que ser mayor en esta pasta ya que ayuda a que se mueva por el agua de cocción, mientras que los espaguetis ya lo hacen por efecto de las burbujas de vapor.

Tabla IV- 26. Propiedades de cocinado de espagueti fino, T1, grueso, T2, y macarrón cocidos a dos potencias hasta su tiempo óptimo con agitación y sin agitación.

	Potencia P1		Potencia P2	
	Con agitación	Sin agitación	Con agitación	Sin agitación
Espagueti T1				
SI (%)	142,74 $\pm$ 3,10 a,A	140,81 $\pm$ 1,04 a,A	141,45 $\pm$ 5,27 a,A	141,12 $\pm$ 3,11 a,A
WAI (%)	120,23 $\pm$ 3,10 a,A	117,87 $\pm$ 2,29 a,A	119,16 $\pm$ 4,20 a,A	114,80 $\pm$ 3,14 a,A
VE (mL/g)	0,94 $\pm$ 0,07 a,A	1,19 $\pm$ 0,07 b,A	0,84 $\pm$ 0,07 b,A	1,19 $\pm$ 0,06 a,A
CL (%)	4,98 $\pm$ 0,30 a,A	4,89 $\pm$ 0,01 a,A	4,92 $\pm$ 0,02 a,A	4,97 $\pm$ 0,10 a,B
T (NTU)	172,60 $\pm$ 4,72 a,A	137,00 $\pm$ 15,49 b,A	223,00 $\pm$ 1,58 b,B	177,20 $\pm$ 5,89 a,B
Espagueti T2				
SI (%)	138,33 $\pm$ 4,34 a,A	137,83 $\pm$ 1,21 a,A	139,53 $\pm$ 2,69 a,A	143,31 $\pm$ 1,68 b,B
WAI (%)	102,02 $\pm$ 1,93 a,A	101,66 $\pm$ 1,37 a,A	104,20 $\pm$ 1,69 a,A	104,58 $\pm$ 1,94 a,B
VE (mL/g)	1,08 $\pm$ 0,04 a,A	1,06 $\pm$ 0,08 a,A	1,16 $\pm$ 0,00 a,B	1,14 $\pm$ 0,04 b,B
CL (%)	4,17 $\pm$ 0,04 a,A	3,81 $\pm$ 0,03 a,A	4,07 $\pm$ 0,17 a,A	4,15 $\pm$ 0,04 b,B
T (NTU)	163,80 $\pm$ 3,70 a,A	115,25 $\pm$ 1,00 b,A	166,00 $\pm$ 9,34 a,A	145,52 $\pm$ 1,10 b,B
Macarrón				
SI (%)	88,90 $\pm$ 1,64 a,A	85,24 $\pm$ 2,01 a,A	88,24 $\pm$ 1,98 a,A	87,39 $\pm$ 2,06 a,B
WAI (%)	63,73 $\pm$ 4,08 a,A	65,80 $\pm$ 3,22 a,A	63,55 $\pm$ 2,53 a,A	65,94 $\pm$ 3,56 a,A
VE (mL/g)	0,70 $\pm$ 0,04 a,A	0,68 $\pm$ 0,01 a,A	0,74 $\pm$ 0,05 a,A	0,71 $\pm$ 0,06 a,B
CL (%)	3,08 $\pm$ 0,03 a,A	2,57 $\pm$ 0,07 b,A	3,30 $\pm$ 0,03 a,B	3,20 $\pm$ 0,07 b,B
T (NTU)	94,52 $\pm$ 7,39 a,A	51,28 $\pm$ 0,40 b,A	95,24 $\pm$ 0,45 a,A	78,86 $\pm$ 2,54 b,B

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre cocción con agitación y sin agitación para una misma potencia. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre potencias para una misma condición de cocción.

Las diferencias puntuales que se han encontrado en algunos casos en el volumen de expansión o de índice de hinchamiento cuando se compara la cocción con y sin

agitación no han permitido establecer tendencias claras de la influencia de esta acción en estas propiedades de cocinado.

La influencia de un cambio de potencia en los parámetros de calidad de la pasta cuando ésta se cocinaba sin agitación se atenúa considerablemente cuando la cocción se realiza agitando; de hecho, solamente se han encontrado diferencias en la turbidez para el espagueti fino y en las pérdidas por cocción en el macarrón. Esto puede ser debido a que la agitación externa produce efectos similares en cuanto a creación de turbulencia en el medio que el fuerte borboteo que se genera cuando la cocción es a la máxima potencia.

4.3.6 Influencia de la potencia aplicada durante la cocción en la calidad de pastas de diferente composición

El incremento del consumo de productos integrales y el aumento de personas con intolerancia al gluten, ha motivado que también se quiera conocer si la potencia suministrada durante la cocción influye en las propiedades de cocción y en la textura de la pasta integral y de la pasta sin gluten, de forma similar, o no, a cómo lo hace en el caso de la pasta refinada con gluten. Además, este estudio permitirá comparar los parámetros de calidad de pastas de diferente composición cocidas en las mismas condiciones.

Como pasta integral se eligieron espaguetis elaborados con sémola integral de trigo *durum*, del mismo diámetro que los espaguetis denominados gruesos, T2. En la Tabla IV- 27 se muestran los parámetros de calidad analizados para los dos tipos de pasta cocidas a dos potencias hasta su tiempo óptimo de cocción (9 min). La pasta integral resultó tener pérdidas por cocción significativamente mayores que la pasta refinada y, consecuentemente, también presentó mayor turbidez el agua de cocción de la pasta integral para las dos potencias. Estos resultados concuerdan con los de otros autores como Bock et al. (2015), West et al. (2013) y Manthey y Schorno (2002). West et al. (2013) argumentaron como explicación a esto, que el salvado probablemente interfiere en la formación de la red proteínica, lo que disminuye la encapsulación del almidón y permite que haya más lixiviación de amilosa al agua de cocción. Las propiedades estructurales de la pasta están gobernadas por una red compleja de interacciones entre proteínas y almidón que contribuyen a la calidad de la pasta cocida. Durante el procesado de la pasta y su secado, es el gluten el que contribuye mayoritariamente a la estructura de esa red, mientras que en la estructura de la pasta cocida contribuyen ambos, almidón y gluten. La

capacidad de la red de gluten para prevenir la fusión de los gránulos de almidón gelatinizados es un elemento clave para obtener una pasta cocida de calidad óptima (Bonomi et al., 2012). El salvado supone una interferencia puesto que origina una redistribución del agua ligada en el sistema gluten-salvado (Gan et al., 1989), afectando a la estructura secundaria del gluten (Bock et al., 2013; Bock y Damodaran, 2013). El resultado es una red de gluten más suelta y menos compacta en la pasta de trigo integral cocida (Bock et al., 2015) y por lo tanto, más tendente a liberar compuestos al agua de cocción.

Tabla IV- 27. Propiedades de cocinado y textura de espaguetis de pasta refinada e integral cocidos a dos potencias hasta su tiempo óptimo de cocción (9 min).

Parámetros	Potencia P1		Potencia P2	
	Refinada	Integral	Refinada	Integral
SI (%)	137,83 ±1,21 a,A	137,48 ±3,29 a,A	143,31 ±1,68 a,B	141,96 ±4,63 a,B
WAI (%)	101,66 ±1,37 a,A	102,13 ±1,35 a,A	104,58 ±1,94 a,B	102,95 ±2,73 a,A
VE (mL/g)	1,06 ±0,08 a,A	1,09 ±0,06 a,A	1,14 ±0,04 a,B	1,13 ±0,02 a,A
CL (%)	3,81 ±0,03 a,A	4,12 ±0,04 b,A	4,15 ±0,04 a,B	4,61 ±0,05 b,B
Turbidez (NTU)	115 ±1,00 a,B	246 ±1,00 b,A	146 ±1,10 a,B	340 ±3,00 b,B
F(N)	3,25 ±0,24 a,B	4,35 ±0,34 b,A	2,96 ±0,19 a,A	3,81 ±0,21 b,B
TC(N·cm)	0,39 ±0,02 a,A	0,40 ±0,02 a,A	0,38 ±0,02 a,A	0,40 ±0,02 a,A
P(N)	4,97 ±1,11 b,A	3,20 ±0,71 a,A	5,34 ±0,72 b,B	4,07 ±0,66 a,B
TA (N·s)	0,26 ±0,07 a,A	0,25 ±0,02 a,A	0,27 ±0,10 b,A	0,23 ±0,04 a,A

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p<0,05$) entre pasta refinada e integral para una misma potencia. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p<0,05$) entre potencias para pastas de una misma composición.

El resto de propiedades de cocinado no presentaron diferencias significativas entre la pasta integral y la refinada. Sin embargo, hay otros trabajos en los que el índice de hinchamiento (Kaur et al., 2012) y la absorción de agua (Aravind et al., 2012; Vignola et al., 2018) disminuían al aumentar el contenido de salvado y germen.

En cuanto a la textura de la pasta, los espaguetis integrales presentaron una mayor firmeza al corte y una menor pegajosidad. La misma tendencia fue observada por varios autores (Aravind et al., 2012; Sozer et al., 2007; Vignola et al., 2018), que encontraron una relación directa entre el contenido de salvado y germen y la dureza de la pasta cocida. Además, Bock et al. (2015) concluyeron en concordancia con nuestros resultados que la pasta cocida de harina refinada era más adhesiva que la pasta elaborada con harina integral.

Por otra parte, la influencia de la potencia en los parámetros de calidad de los espaguetis integrales, es similar a la anteriormente descrita para espaguetis refinados. El índice de hinchamiento, las pérdidas por cocción y la turbidez son mayores cuando se cocina a potencia alta, resultando además una pasta menos firme y más pegajosa.

Como pasta sin gluten se eligieron espaguetis de harina de maíz, arroz y quínoa, de diámetro similar a los espaguetis con gluten. En la Tabla IV- 28 se muestran los resultados obtenidos de las propiedades de cocinado y de textura de los espaguetis refinados con gluten y los espaguetis sin gluten cocidos a las dos potencias hasta el tiempo óptimo de cocción (9 min). En los espaguetis sin gluten las pérdidas por cocción y la turbidez aumentan mucho con la potencia de cocción de forma que, a baja potencia los espaguetis sin gluten presentaron menores pérdidas por cocción que los espaguetis con gluten, pero a alta potencia, tuvieron mayores pérdidas los espaguetis sin gluten. Por ello sería aconsejable cocinar las pastas sin gluten a baja potencia para reducir las altas pérdidas por cocción de este tipo de pastas, motivada por la menos eficiente retención de los sólidos atrapados en la matriz de la pasta (Diantom et al., 2019), lo que resulta en una mayor dispersión de componentes en el agua de cocción (Cabrera-Chavez et al., 2012). El resto de propiedades de cocinado no cambiaron con la potencia.

La absorción de agua de la pasta sin gluten depende mucho de la formulación de la misma. La mayoría de las pastas sin gluten presentan valores menores de absorción de agua que las pastas con gluten, excepto la pasta elaborada con harina de arroz (Lucisano et al., 2012) y las formuladas a base de arroz y quínoa (Morreale et al., 2019) que presentan valores similares a la pasta con gluten. La pasta sin gluten con la que se ha realizado este estudio, al contener harina de arroz y de quínoa, tiene un índice de absorción de agua que no difiere significativamente al de la pasta con gluten cuando la cocción se realizaba a alta potencia y es superior a la de la pasta con gluten a baja potencia. Sin embargo, la pasta sin gluten se expande menos que la pasta con gluten a pesar de esa similar o incluso superior absorción de agua.

Los espaguetis sin gluten presentan una mayor firmeza al corte y una menor pegajosidad. Morreale et al. (2019) encontraron dos grupos diferenciados de valores de firmeza, uno significativamente mayor que la pasta con gluten y otro menor. En el grupo que presentaba valores de firmeza mayores que la pasta con gluten, se encontraban pastas

elaboradas con harina de arroz y maíz. Por lo tanto, los resultados de estos autores están en concordancia con los aquí obtenidos. En cuanto a la pegajosidad tan baja de la pasta sin gluten puede ser debido a los aditivos utilizados como estructurante que se utilizan en la mayoría de las pastas (Morreale et al., 2019).

Por otra parte, la influencia de la potencia aplicada durante el cocinado en las propiedades de cocinado de la pasta es similar en la pasta sin gluten que en la pasta con gluten. Presentaron diferencias significativas el índice de hinchamiento, las pérdidas por cocción y la turbidez del agua de cocción, siendo mayores los valores obtenidos con la potencia más alta. El efecto del nivel de potencia en la textura es similar en los espaguetis sin gluten que en los que tienen gluten, a mayor potencia menor firmeza y mayor pegajosidad.

Tabla IV- 28. Propiedades de cocinado y textura de espaguetis de pasta refinada e integral cocidos a dos potencias hasta su tiempo óptimo de cocción (9 min).

Parámetros	Potencia P1		Potencia P2	
	Con gluten	Sin gluten	Con gluten	Sin gluten
SI (%)	137,83 ±1,21 b,A	133,06 ±1,79 a,A	143,31 ±1,68 b,B	135,56 ±1,36 a,B
WAI (%)	101,66 ±1,37 a,A	106,23 ±2,11 b,A	104,58 ±1,94 a,B	105,40 ±1,43 a,A
VE (mL/g)	1,06 ±0,08 a,A	1,00 ±0,02 a,A	1,14 ±0,04 b,B	1,06 ±0,11 a,A
CL (%)	3,81 ±0,03 a,A	1,47 ±0,05 b,A	4,15 ±0,04 a,B	5,44 ±1,80 b,B
Turbidez (NTU)	115 ±1,00 a,A	126 ±2,00 b,A	146 ±1,10 a,B	673 ±18,0 b,B
F(N)	3,25 ±0,24 a,B	4,49 ±0,34 b,A	2,96 ±0,19 a,A	3,93 ±0,39 b,B
TC (N·cm)	0,39 ±0,02 a,A	0,42 ±0,02 b,A	0,38 ±0,02 a,A	0,37 ±0,02 a,B
P (N)	4,97 ±1,11 b,A	1,48 ±0,25 a,A	5,34 ±0,72 b,B	1,59 ±0,20 a,A
TA (N·s)	0,26 ±0,07 a,A	0,12 ±0,01 a,A	0,27 ±0,10 b,A	0,09 ±0,01 a,A

Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas entre pasta con gluten y sin gluten para una misma potencia. Letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre potencias para un mismo tipo de pasta Test de Duncan ($p < 0,05$).

4.3.6.1 Contenido en almidón resistente de la pasta cocinada a diferentes potencias

La pasta convencional presenta valores bajos de almidón resistente, que como ya se ha comentado actúa como fibra en nuestro organismo, por lo que la presencia de almidón resistente proporciona numerosos efectos beneficiosos para la salud como la capacidad de modular la glucemia, la colesterolemia y la homeostasis de la microbiota intestinal, entre otros (Arp et al., 2021). La formación de almidón resistente depende del contenido en amilosa, de la cantidad de agua de cocción y de su temperatura (Sagum y

Arcot, 2000). Existe controversia sobre el efecto del tiempo de cocinado en la formación de almidón resistente. Sgrulletta et al. (2005) demostraron que la cocción de los espaguetis conducía a un incremento en el contenido de almidón resistente. Sin embargo, si se extiende el tiempo de cocción en el espagueti con respecto al ideal, los componentes de la pasa que son fácilmente solubles en agua como la amilosa, migran al agua de cocción, y entre ellos también se encuentran los productos de hidrólisis del almidón gelatinizado tales como los oligosacáridos y los azúcares simples (Simões de Borba et al., 2021). La migración de carbohidratos solubles y otros compuestos solubles afecta a la formación de almidón resistente. Sin embargo, hasta nuestro conocimiento, no se ha explorado si el contenido en almidón resistente se ve afectado indirectamente por la potencia a la que se cocina la pasta. Es por ello que determinó el almidón resistente, digerible y total para estudiar el efecto de cocinar a diferentes potencias con la pasta de trigo refinado, trigo integral y sin gluten (Tabla IV- 29).

Tabla IV- 29. Almidón resistente, digerible y total en espaguetis de harina refinado, harina integral y sin gluten para pasta cruda y cocinada a dos potencias durante 9 min.

<i>Muestra</i>	<i>Resistente (g/100g b.s.)</i>	<i>Digerible (g/100g b.s.)</i>	<i>Total (g/100g b.s.)</i>
Refinado Crudo	0,58 ±0,03 a	74,32 ±1,54 a	76,90 ±1,48 a
Refinado P1	0,99 ±0,04 b	75,69 ±0,71 a	76,68 ±0,72 a
Refinado P2	1,11 ±0,06 b	74,1 ±0,39 a	75,21 ±0,36 a
Integral crudo	0,3 ±0,02 a	69,44 ±0,96 a	69,74 ±0,95 a
Integral P1	0,87 ±0,04 b	68,15 ±0,4 a	68,92 ±0,46 a
Integral P2	0,78 ±0,06 b	69,98 ±1,36 a	70,76 ±1,33 a
Sin gluten Crudo	0,92 ±0,07 a	84,07 ±0,61 a	84,99 ±0,68 a
Sin gluten P1	0,45 ±0,05 b	84,61 ±0,17 a	85,06 ±0,18 a
Sin gluten P2	0,5 ±0,06 b	84,27 ±0,35 a	84,77 ±0,33 a

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre valores para un mismo tipo de pasta.

Para el espagueti de trigo refinado y el espagueti de trigo integral se obtuvieron valores significativamente mayores de almidón resistente en el espagueti cocinado respecto al crudo. Este resultado coincide con el trabajo de algunos autores como De Arcangelis et al. (2022) o de Ermişer y Yalçın (2021) que encontraron un contenido mayor de almidón resistente en las muestras cocidas en comparación con las muestras sin cocer, lo que podría deberse a cadenas de amilosa retrogradadas que se producen durante el enfriamiento del almidón gelatinizado (Haralampu, 2000). Sin embargo, esto no sucede en los espaguetis sin gluten que, cocidos, tienen menor concentración de almidón

resistente que crudos. En el trabajo de Sagum y Arcot (2000) también encontraron mayores valores de almidón resistente en el arroz en crudo que en el cocido. En la pasta sin gluten hay que tener presente que su comportamiento va a depender de su formulación, de modo que el porcentaje de harina de arroz va a determinar el contenido de almidón resistente.

4.4 CARACTERIZACIÓN DE LA COCCIÓN DE VEGETALES POR INMERSIÓN EN AGUA HIRVIENDO

El creciente interés por conservar los micronutrientes y antioxidantes de las hortalizas ha motivado la investigación sobre las pérdidas nutricionales de las hortalizas durante su manipulación y cocción. Varios estudios han evaluado el efecto de diferentes métodos de cocción sobre la capacidad nutricional y las propiedades organolépticas de los vegetales (Faller y Fialho, 2009; Guillen et al., 2017; Jiménez-Monreal et al., 2009; Juárez et al., 2016; Zhong et al., 2015). La inmersión en agua hirviendo suele considerarse uno de los métodos en los que las verduras pierden mayor cantidad de nutrientes, principalmente porque la temperatura y el tiempo necesarios provocan la degradación térmica y la lixiviación de nutrientes en el agua de cocción (Bureau et al., 2015). A pesar de los efectos negativos del hervido en el valor nutricional de los vegetales, sigue siendo uno de los métodos de cocción más comunes por lo que sería interesante reducir las pérdidas nutricionales asociadas a este método. La fluidodinámica del medio de cocción (velocidad de movimiento del fluido, el tamaño y la densidad de las burbujas...) seguramente afectará a la transferencia de componentes de los vegetales al agua. En la mayoría de los electrodomésticos y equipos utilizados en el ámbito doméstico, la potencia calorífica suministrada para cocinar es modificable y, por tanto, se puede elegir el régimen de ebullición. En este trabajo se quiso comprobar si la potencia suministrada durante la ebullición afecta a las propiedades organolépticas y nutricionales de los vegetales y cuantificar su influencia. Se evaluó el efecto de la potencia calorífica suministrada durante la cocción sobre el color, la textura, el contenido de clorofila y fenoles totales, y la actividad antioxidante de diferentes vegetales (alcachofas, brócoli, judías verdes y acelgas) seleccionados por sus diferentes características morfológicas (inflorescencias, frutos y hojas) y de composición. Además, se desarrolló un modelo matemático de estimación de pérdida de nutrientes por lixiviación en función de la potencia calorífica suministrada a partir de medidas experimentales de la conductividad eléctrica del agua durante la cocción de estos vegetales.

4.4.1 Efecto de la potencia suministrada durante la cocción en la calidad de los vegetales hervidos

4.4.1.1 Humedad y textura

Los parámetros relacionados con la calidad de los cuatro vegetales hervidos a varias potencias se muestran en las Tabla IV- 30 a Tabla IV- 32. Las alcachofas y el brócoli muestran un aumento estadísticamente significativo ($p < 0,05$) en el contenido de humedad después de la cocción para todas las potencias, lo que se asocia con la absorción de agua en las células dañadas y la fuga de materia seca al medio de cocción (Baardseth et al., 2010). El aumento es especialmente significativo para el brócoli (10%) que puede estar asociado a su mayor contenido en fibra y a las características de las pectinas que presenta. Durante el tratamiento térmico, las pectinas con grado de metilación de aproximadamente 56 %, pueden desmetilarse e incrementar las interacciones con cationes divalentes y en consecuencia, retener agua en mayor medida (Christiaens et al., 2011; Petkowicz y Williams, 2020). También se observa este fenómeno en las judías verdes, aunque con un aumento más acusado. No se observan diferencias entre los diferentes niveles de potencia ensayados para ninguno de los vegetales.

Tabla IV- 30. Humedad y dureza de los vegetales hervidos a diferentes potencias

Vegetal	Potencia efectiva (W)				
	Crudo	753	1087	1610	2010
Humedad (g agua/100 g muestra)					
Alcachofa	79,81± 0,24 ^a	85,13±0,58 ^b	85,09±0,57 ^b	84,87±0,65 ^b	84,34±0,55 ^b
Brócoli	84,92±0,27 ^a	93,90±0,61 ^b	93,56±0,48 ^b	93,95±0,52 ^b	93,57±0,59 ^b
Judías	90,47±0,33 ^a	92,00±0,44 ^b	92,20±0,63 ^b	91,90±0,59 ^b	91,80±0,54 ^{ab}
Acelgas	91,23±0,21 ^b	89,06±0,65 ^a	89,66±0,56 ^{ab}	90,13±0,54 ^{ab}	90,25±0,60 ^{ab}
Dureza (N)					
Alcachofa	132,1±13,6 ^b	78,2±6,3 ^a	73,8±5,8 ^a	75,1±8,7 ^a	79,4±6,6 ^a
Brócoli	10,3±0,8 ^b	4,2±0,4 ^a	4,0±0,3 ^a	3,8±0,5 ^a	3,9±0,4 ^a
Judías	57,9±2,1 ^b	8,2±0,6 ^a	8,6±0,4 ^a	8,5±0,5 ^a	8,5±0,7 ^a
Acelgas	23,2±1,2 ^b	0,9±0,1 ^a	0,8±0,1 ^a	0,8±0,2 ^a	0,9±0,1 ^a

Los valores son medias ± desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre condiciones para un mismo vegetal.

La dureza disminuyó debido a la degradación térmica en todos los vegetales sin una diferencia significativa apreciable ($p > 0,05$) entre las muestras hervidas a diferentes potencias (Tabla IV- 30). La pérdida de firmeza fue de un 40% para la alcachofa, un 60%

en brócoli, un 86% para las judías verdes y el más elevado, con un 96% para las acelgas, pero como se ha indicado en ningún caso se observó efecto de la potencia de cocción.

4.4.1.2 Color y contenido en clorofilas

La luminosidad y la tonalidad verde característica de cada vegetal fueron inferiores para el producto cocinado que para el producto crudo (Tabla IV- 31). Aunque se ha afirmado que un tratamiento térmico de corta duración, como el escaldado, aumenta el valor de la coordenada a^* debido a la sustitución del aire intercelular por jugo celular (Zhan et al., 2018), los trabajos de varios autores corroboran nuestros resultados para tratamientos térmicos prolongados como el hervido; es decir, que la intensidad de la tonalidad verde del brócoli, las judías verdes y las acelgas disminuye durante la cocción (Gonnella et al., 2018; Turkmen et al., 2006). Por el contrario, las alcachofas hervidas tienen una tonalidad verde superior al de las alcachofas crudas debido a su alto contenido en hierro y al ácido o-difenólico que, en presencia de oxígeno, forma complejos de color verde azulado oscuro con el ion Fe^{3+} oxidándose a Fe^{2+} durante la cocción (Terzic et al., 2012). Excluyendo el brócoli, para el cual la pérdida de tonalidad verde está acompañada de un aumento de la tonalidad amarilla, las verduras no mostraron diferencias significativas en la coordenada b^* entre muestras crudas y hervidas. Además, la intensidad de la ebullición no afectó a los cambios de color de las verduras durante la cocción, ya que no se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) en el color (coordenadas L^* , a^* y b^*) para las muestras cocinadas a diferentes potencias de calentamiento.

Tabla IV- 31. Coordenadas CIELab, ΔE , h° y C^* de los vegetales hervidos a diferentes potencias.

Vegetal	Potencia efectiva (W)				
	Crudo	753	1087	1610	2010
Coordenada L*					
Alcachofa	62,5±1,1b	42,5±2,4a	40,4±2,1a	41,3±2,2a	42,0±2,4a
Brócoli	40,6±1,3b	28,1±2,1a	27,6±2,0a	28,0±1,7a	26,9±1,2a
Judías	52,5±2,1b	43,7±3,6a	42,5±3,3a	40,2±3,2a	41,9±2,8a
Acelgas	46,6±1,8b	37,6±2,9a	38,1±2,5a	37,7±2,3a	36,7±1,4a
Coordenada a*					
Alcachofa	-2,5±0,7b	-6,6±0,8a	-6,5±0,7a	-6,8±0,7a	-6,7±0,6a
Brócoli	-11,0±1,1a	-7,7±1,3b	-8,1±1,2ab	-7,9±1,0ab	-7,7±1,4b
Judías	-15,3±0,5a	-9,0±0,8b	-8,5±0,9b	-9,0±1,0b	-8,7±0,7b
Acelgas	-18,8±0,9a	-13,6±1,6b	-14,0±1,5b	-13,8±1,1b	-14,2±1,8b
Coordenada b*					
Alcachofa	17,3±0,5a	17,3±1,9a	19,7±2,0a	17,0±2,2a	18,5±2,3a
Brócoli	9,4±0,9a	18,1±2,4b	15,5±3,3ab	16,7±3,1b	17,0±2,6b
Judías	27,1±0,7a	24,2±2,1a	25,3±2,2a	25,8±2,3a	23,6±1,9a
Acelgas	26,1±1,4a	23,2±1,7a	24,6±1,5a	24,0±1,8a	25,9±1,6a
ΔE					
Alcachofa		20,40±1,20a	22,63±0,85b	21,67±1,10ab	21,00±1,20ab
Brócoli		15,63±0,15a	14,93±2,32a	15,00±0,75a	16,03±2,85a
Judías		11,27±1,70a	12,70±3,77a	14,03±0,42a	13,30±3,46a
Acelgas		11,03±0,25a	10,20±0,52a	11,27±4,27a	10,93±0,06a
h°					
Alcachofa	171,83±2,05c	159,57±0,99a	161,73±0,15b	158,17±0,55a	159,97±0,51ab
Brócoli	130,50±0,10a	157,03±0,75b	151,63±8,58b	154,53±1,36b	155,70±0,66b
Judías	150,57±0,15a	159,60±0,00b	161,43±0,35b	160,60±3,60b	159,80±0,00b
Acelgas	144,23±0,15a	149,67±4,60b	150,30±4,15b	150,10±0,10b	151,37±1,60b
C^*					
Alcachofa	17,50±0,60a	18,47±2,15a	20,73±2,15a	18,30±2,30a	19,60±2,25a
Brócoli	14,47±1,45a	19,70±2,70b	17,60±2,35ab	18,50±3,20ab	18,67±2,95ab
Judías	31,13±0,85a	25,83±2,25b	26,70±2,40b	27,33±1,85b	25,1±2,057b
Acelgas	32,17±1,65a	26,90±0,70b	28,33±0,55b	27,70±2,10b	29,53±2,25ab

Los valores son medias $\pm$ desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre condiciones para un mismo vegetal.

Estos cambios en las coordenadas a^* y b^* motivado por la cocción se tradujeron en un descenso en la intensidad del color o croma, C^* , para las judías verdes y las acelgas. Sin embargo, el hecho de que el brócoli cocido tenga una mayor coordenada b^* que el crudo y que la coordenada a^* de las alcachofas cocidas sea menor que el de las crudas

implicó que el croma de estos productos no descendiese tras la cocción. El tono, h° , aumenta por la cocción en todos los vegetales salvo en las alcachofas cuyos cambios de color no parecen seguir el mismo patrón que el resto de los vegetales. En otros trabajos sobre cocción de vegetales verde, concretamente espinacas, también se ha descrito un descenso del croma tras la cocción y un aumento del tono (Czarnowska-Kujawska et al., 2022). En el caso de la cocción de la alcachofa, el descenso acusado de L^* ha sido atribuido al inicio de reacciones de pardeamiento inducidas por el tratamiento térmico (Guida et al., 2013). Tanto en las alcachofas como en el brócoli, el contenido en fenoles y otros flavonoides es muy elevado y tienen un importante papel el color de los mismos, junto con las clorofilas. Se han descrito fenómenos tanto de isomerización como de hidrólisis de compuestos fenólicos durante el procesado culinario de las alcachofas (Ferracane et al., 2008). Las diferencias de color (ΔE) entre las muestras crudas y cocinadas fueron en todos los casos evidentes para el ojo humano, con valores de entre 10 y 22, pero sin observarse diferencias entre las potencias de cocción para un mismo vegetal. Estos valores están en el rango de otros autores para cocciones en ebullición (Czarnowska-Kujawska et al., 2022).

Los cambios de color se relacionan con la concentración de clorofila (Tabla IV-32), ya que la degradación de este pigmento explica la mayoría de los cambios de color de los vegetales verdes durante la cocción. Para todos los vegetales la clorofila se degrada durante la cocción en porcentajes que varían entre el 13,5 y el 58,2 %. La clorofila a es más susceptible al tratamiento térmico que la clorofila b. Los estudios han demostrado que la degradación térmica de la clorofila durante la ebullición se reduce bajando la temperatura del agua de cocción por debajo de los 100 °C, pero no manteniendo el producto fuera del contacto con el agua de cocción como, por ejemplo, en el método *sous-vide* (Guillen et al., 2017). La lixiviación no es un factor muy relevante en la pérdida del contenido de clorofila, lo que explicaría que la vigorosidad de la ebullición no afecte a su retención, ya que no hay diferencias significativas en la concentración de clorofila ($p>0,05$) entre muestras cocinadas a distinta potencia como tampoco lo había en el color.

Tabla IV- 32. Concentración de clorofila en vegetales hervidos a diferentes potencias.

Vegetal	Potencia efectiva (W)				
	Crudo	753	1087	1610	2010
Concentración de clorofila total (mg/g m.s.)					
Alcachofa	1,050±0,017 ^b	0,612±0,013 ^a	0,608±0,014 ^a	0,605±0,013 ^a	0,596±0,014 ^a
Brócoli	1,392±0,021 ^b	0,601±0,018 ^a	0,600±0,012 ^a	0,605±0,015 ^a	0,598±0,012 ^a
Judías	2,589±0,027 ^b	1,100±0,019 ^a	1,083±0,018 ^a	1,084±0,017 ^a	1,092±0,014 ^a
Acelgas	6,583±0,031 ^b	5,714±0,035 ^a	5,699±0,026 ^a	5,708±0,025 ^a	5,691±0,029 ^a
Concentración de clorofila a (mg/g m.s.)					
Alcachofa	0,340±0,010 ^b	0,191±0,015 ^a	0,190±0,014 ^a	0,189±0,010 ^a	0,186±0,012 ^a
Brócoli	1,043±0,019 ^b	0,351±0,013 ^a	0,355±0,008 ^a	0,352±0,014 ^a	0,356±0,015 ^a
Judías	1,702±0,025 ^b	0,290±0,015 ^a	0,282±0,021 ^a	0,288±0,020 ^a	0,291±0,016 ^a
Acelgas	4,173±0,028 ^b	3,548±0,033 ^a	3,550±0,032 ^a	3,557±0,035 ^a	3,553±0,030 ^a
Concentración de clorofila b (mg/g m.s.)					
Alcachofa	0,710±0,015 ^b	0,421±0,013 ^a	0,418±0,011 ^a	0,416±0,015 ^a	0,410±0,013 ^a
Brócoli	0,349±0,013 ^b	0,180±0,011 ^a	0,245±0,014 ^a	0,253±0,014 ^a	0,242±0,015 ^a
Judías	0,887±0,014 ^b	0,810±0,015 ^a	0,801±0,013 ^a	0,796±0,016 ^a	0,801±0,017 ^a
Acelgas	2,410±0,028 ^b	2,166±0,034 ^a	2,149±0,035 ^a	2,151±0,036 ^a	2,138±0,036 ^a

Los valores son medias ± desviación estándar. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre condiciones para un mismo vegetal.

4.4.1.3 Contenido de fenoles totales y capacidad antioxidante

En la Tabla IV- 33 se muestra la concentración de fenoles totales y la capacidad antioxidante en los vegetales hervidos a diferentes potencias. Es de destacar el diferente contenido en fenoles de los vegetales crudos. La alcachofa es un producto con un contenido muy elevado (1160 ± 35 mg GAE/100g ms), mientras que el contenido de fenoles del brócoli es aproximadamente diez veces menor (117 ± 4 mg GAE/100g ms). El contenido total de fenoles en las alcachofas, el brócoli y las acelgas después de la cocción es menor que el del producto crudo. Los compuestos fenólicos, que contienen en su estructura enlaces y grupos hidroxilo, son compuestos termolábiles que pueden sufrir reacciones de oxidación, polimerización y epimerización cuando se exponen a temperaturas altas (Faller y Fialho, 2009; Guillen et al., 2017). Las alcachofas experimentaron una acusada disminución en su contenido fenólico (41,0%) cuando la cocción se llevó a cabo a alta potencia (2010 W). Si las alcachofas se hierven a la potencia mínima (753 W), la retención aumenta hasta el 78,0%, lo que supone una mejora significativa de su aporte nutricional. El brócoli y las acelgas tienen mayores pérdidas de

fenoles que las alcachofas; cuando la ebullición es muy intensa (2010 W), las pérdidas son del 90,0% y del 86,2% para el brócoli y la acelga, respectivamente. Asimismo, para estos vegetales, las pérdidas disminuyen cuando se reduce la potencia de calentamiento (al 75,4% para el brócoli y al 75,8% para las acelgas). En otras investigaciones también se ha descrito una reducción del contenido de fenoles en brócoli sometido a hervido durante 5 minutos de en torno al 50% (Bunea et al., 2008; Czarnowska-Kujawska et al., 2022). Por tanto, incluso a tiempos de cocción cortos las pérdidas son muy significativas. Además, la retención de compuestos fenólicos se ve favorecida por la reducción de la temperatura de cocción (Ismail et al., 2004) pero también por las condiciones en las que se evitan las pérdidas por lixiviación. Este segundo factor explica los resultados obtenidos por este estudio, ya que una menor potencia calorífica reduciría la turbulencia y la lixiviación de compuestos al agua de cocción.

En las judías verdes se ha observado un efecto diferente al descrito para el resto de los productos, ya que el contenido en compuestos fenólicos se mantiene en valores similares a los que presentan las judías verdes crudas en la cocción a potencias más elevadas y ligeramente superiores en el caso de la cocción a la potencia inferior. En este caso, parece que el efecto del calor ablandando la matriz vegetal y la consecuente liberación de compuestos bioactivos parece ser más importante que las pérdidas por lixiviación y la degradación por calor. Además, se ha descrito que los tratamientos térmicos en judía, especialmente a baja temperatura, pueden inducir la formación de un entramado de pectinas de bajo metoxilo que, en presencia de calcio, pueden formar un gel (Stolle-Smits et al., 2000). Un pequeño porcentaje de los azúcares de los polisacáridos de la pared, contienen ácido ferúlico y compuestos fenólicos, que pueden participar en la formación de puentes diferulados, contribuyendo a la formación de una red de polisacáridos y de este modo, ser menos susceptibles a la lixiviación. Turkmen et al. (2005) encontraron resultados similares para este vegetal, y se atribuye a un aumento en el nivel de flavonoides libres causado por el tratamiento térmico (Stewart et al., 2000). Delchier et al. (2012) también afirmaron que la cocción no indujo la fuga de fenoles respecto a las judías verdes frescas.

Tabla IV- 33. Contenido fenólico total y capacidad antioxidante en vegetales hervidos a diferentes potencias.

Vegetal	Potencia suministrada (W)				
	Crudo	753	1087	1610	2010
Contenido fenólico total (mg GAE/ 100 g m.s.)					
Alcachofas	1160±35d	905±27c	807±24cb	727±32ab	684±21a
Brócoli	171±4e	42±2d	36±1c	27±1b	17±1a
Judías verdes	740±21a	810±26b	762±19ab	748±25ab	720±25a
Acelgas	434±30c	105±4b	82±3ab	70±2a	60±2a
Capacidad antioxidante (mg Trolox/100 g m.s.)					
Alcachofas	17388±504e	14502±304d	13177±416c	10120±232b	7643±244a
Brócoli	3566±111d	1006±36c	870±25b	635±22a	565±16a
Judías verdes	3351±100a	5406±161c	5326±144cb	5271±156cb	5007±163b
Acelgas	2098±64d	1196±35c	956±31b	873±39b	752±30a

Los valores son medias ± desviación estándar. Letras diferentes implica las diferencias significativas ($p < 0,05$) entre condiciones de cocción para un mismo vegetal.

La capacidad antioxidante de los vegetales estudiados sigue la misma tendencia que el contenido de fenoles, coincidiendo con los hallazgos de otros autores (Faller y Fialho, 2009). En todos los vegetales, excepto las judías verdes, se observaron elevadas pérdidas en la capacidad antioxidante debido a la cocción, que oscilaron entre el 84,1 % en el brócoli y el 56,0 % en las alcachofas. La reducción de la turbulencia del agua de cocción favorece la retención de la capacidad antioxidante, siendo las alcachofas las más beneficiadas por la cocción a baja potencia, reduciéndose las pérdidas al 16,6%. El brócoli y las acelgas también mejoran su valor nutricional en cuanto a capacidad antioxidante si se cocinan a baja potencia, aunque las pérdidas siguen siendo considerables (del 71,8% y 43,0%, respectivamente). Como era de esperar, dada la evolución del contenido de fenoles, la capacidad antioxidante de las judías verdes hervidas es mayor que la del producto fresco. Se han sugerido varios mecanismos para este aumento, como la liberación de componentes antioxidantes debido a la disrupción tisular, la liberación de proteínas o la inactivación térmica de enzimas oxidativas (Delchier et al., 2012; Jiménez-Monreal et al., 2009).

4.4.2 Efecto de la potencia suministrada durante la cocción en la lixiviación de nutrientes

Se quiso corroborar si las diferencias en el valor nutricional de los vegetales cocinados a distintas potencias se debían a que la lixiviación avanzaba a una velocidad

diferente dependiendo del régimen de ebullición marcado por la potencia suministrada. Para ello, se midió la progresión de la conductividad eléctrica del agua de cocción de los cuatro vegetales a diferentes potencias de calentamiento, Figura IV- 73.

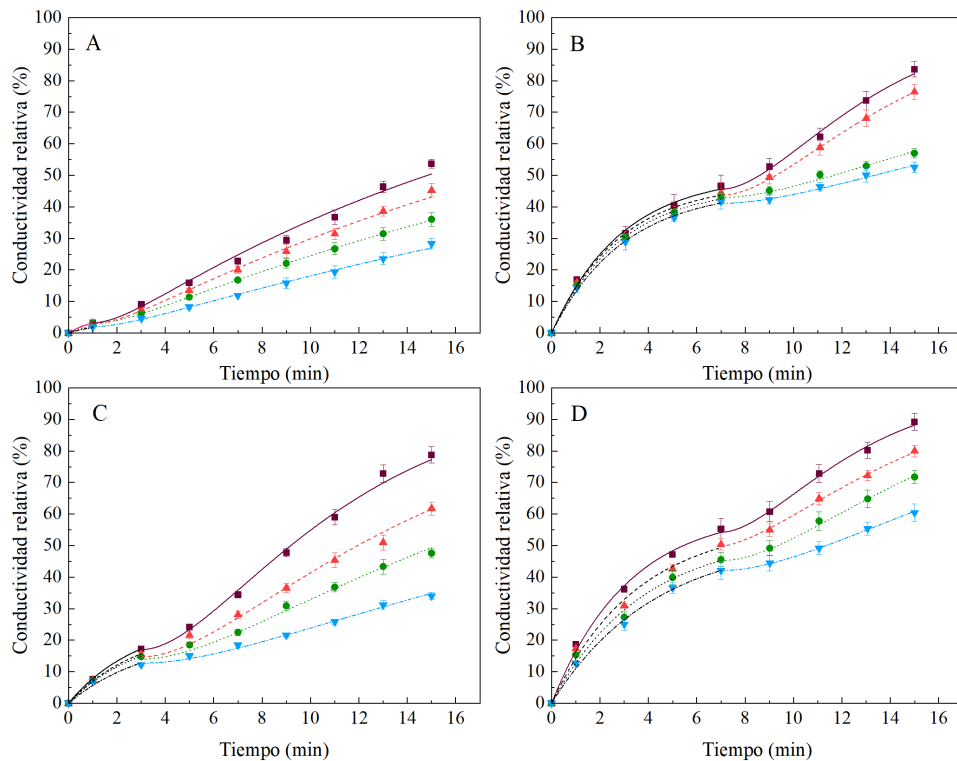


Figura IV- 19. Datos experimentales (puntos) y de modelado (líneas) de la conductividad eléctrica del agua de cocción durante la cocción de alcachofas (A), brócoli (B), judías verdes (C) y acelgas (D) a 753 W (∇ , - - -), 1087 W ($\bullet$, ...), 1610 W ($\blacktriangle$, - - -) y 2010 W ($\blacksquare$, —) (Datos expresados como porcentaje respecto a las medidas obtenidas en autoclave en tratamiento de 30 min)

En todos los casos, la conductividad aumentó con el tiempo de cocción siguiendo la misma tendencia: al principio el crecimiento es exponencialmente asintótico y luego sigmoïdal. Por otra parte, para un mismo tiempo de cocción, la conductividad aumentaba con la potencia suministrada. El aumento de la conductividad eléctrica del agua de cocción puede explicarse por dos reacciones en cadena consecutivas. En la primera, las células intactas C_i se someten a termólisis para generar una fracción de células inhabilitadas, C_i ; en el segundo se produce la lixiviación del contenido de las células inhabilitadas, donde C_w es la fracción de células del vegetal cuyo contenido se ha lixiviado al agua de cocción. Al comienzo de la cocción, se supone que el proceso de lixiviación es mucho más rápido que la lisis; así, considerando la lisis como una reacción

de primer orden con constante cinética k_1 , la evolución de C_w en el tiempo puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$C_w = C_m \cdot (1 - e^{-k_1 t}) \quad \text{ec. (4.16)}$$

Donde C_m es la fracción de células lisiadas a tiempo infinito. A medida que avanza el proceso, el transporte de solutos a través de los poros del sólido hasta llegar a la superficie provendrá de capas más internas, ralentizando así la lixiviación; por lo tanto, después de cierto tiempo t_0 , la evolución de C_w se debería de predecir mediante dos reacciones en serie, tal y como se expresa en la ec. (4.17) considerando que la etapa de lixiviación sigue una cinética de primer orden con constante cinética k_2 :

$$C_w = C_m + (100 - C_m) \cdot \left(1 + k_2 \cdot e^{-k_1(t-t_0)} / (k_1 - k_2) + k_1 \cdot e^{-k_2(t-t_0)} / (k_2 - k_1) \right) \quad \text{ec. (4.17)}$$

Los resultados del ajuste de los datos experimentales a las ecuaciones cinéticas se muestran en la Figura IV- 73 y los valores de los parámetros cinéticos en la Tabla IV- 34. En todos los casos, el coeficiente de determinación (R^2) es mayor a 0,9810, lo que indica que el modelo es adecuado para describir la transferencia de materia al agua de cocción. La constante cinética de lisis k_1 no varía con la potencia, mientras que la de lixiviación, k_2 , aumenta claramente con la potencia suministrada. Este comportamiento lo reflejaban los datos experimentales, ya que, en la primera etapa de la cocción, la conductividad eléctrica del agua no depende tanto de la potencia aplicada como al final del proceso.

Otros autores (Sarvan et al., 2012) han descrito la lisis/lixiviación de células vegetales del género Brassica durante el tratamiento térmico, utilizando una ecuación de primer orden para obtener una constante cinética similar a la de este estudio ($0,11 \text{ min}^{-1}$ a 100°C), sin que estos autores abordaran la influencia del régimen de ebullición.

Tabla IV- 34. Parámetros cinéticos de las etapas de lisis y lixiviación de la ec. (4.17).

Vegetal	Potencia (W)	Cm (%)	k_1 (min ⁻¹)	k_2 (min ⁻¹)	R ²
Alcachofas	753	3,054±0,112	0,844±0,186	0,023±0,001	0,9972
	1087	3,812±0,175	0,821±0,046	0,032±0,001	0,9998
	1610	5,493±0,203	0,838±0,111	0,042±0,001	0,9982
	2010	5,587±0,213	0,872±0,230	0,052±0,002	0,9936
Brocoli	753	45,463±1,354	0,336±0,024	0,045±0,002	0,9810
	1087	46,446±1,112	0,352±0,021	0,057±0,003	0,9811
	1610	47,546±1,732	0,359±0,033	0,180±0,003	0,9984
	2010	50,093±2,616	0,346±0,044	0,249±0,012	0,9929
Judías verdes	753	21,041±1,603	0,312±0,018	0,033±0,001	0,9888
	1087	23,423±0,481	0,338±0,022	0,060±0,002	0,9874
	1610	24,420±0,258	0,342±0,023	0,091±0,005	0,9836
	2010	24,467±0,180	0,350±0,020	0,152±0,007	0,9938
Acelgas	753	51,938±4,352	0,237±0,038	0,097±0,001	0,9983
	1087	53,249±5,683	0,270±0,060	0,163±0,004	0,9974
	1610	56,895±5,397	0,288±0,059	0,198±0,015	0,9965
	2010	60,867±3,556	0,316±0,042	0,346±0,055	0,9906

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES



Primera

Los cambios de color que experimenta la carne de ternera durante el cocinado se han asociado tradicionalmente a las modificaciones que sufre la mioglobina y que se relacionan con la pérdida de la tonalidad roja característica de la carne fresca. Sin embargo, este estudio ha demostrado la importancia de la variación de la luminosidad en los cambios de color, lo que confirma la vinculación de las transformaciones estructurales que sufre la carne durante el calentamiento con la dispersión de la luz.

Segunda

La evolución de las coordenadas L^* y a^* durante el calentamiento de la carne de ternera se puede describir mediante un modelo cinético basado en dos reacciones sucesivas de primer orden de conversión fraccionaria.

Con la implementación de esta cinética en un modelo matemático de cocinado por contacto con una superficie caliente, se ha logrado predecir tanto la evolución de la temperatura como del color de la carne durante el cocinado. Esta ampliación del modelo ha permitido determinar para diferentes grados de cocción el tiempo al que debe darse la vuelta a la carne para lograr que la pieza cárnica se cocine uniformemente por ambos lados.

Tercera

Durante el cocinado se produce un aumento de dureza de la carne asociado a la retracción térmica del tejido conectivo y a la desnaturalización de las proteínas miofibrilares. Esta retracción genera un gradiente de presión en la solución acuosa de los espacios extracelulares que origina un transporte convectivo de agua. Este fenómeno, que explica el transporte de agua en el interior de la carne durante la cocción, se ha tenido en cuenta en el modelo lo que ha permitido predecir la pérdida de peso de la carne en concordancia con los valores experimentales.

Cuarta

Para que las condiciones iniciales de la carne (grosor, temperatura inicial, ...) no afecten al grado de cocción deseado por el usuario, el tiempo de cocinado se debe estimar como aquel con el que se alcanza una determinada pérdida de peso que es característica

de cada grado de cocción. El modelo matemático se utilizó para corroborar que los tiempos de cocción estimados a partir de la pérdida de peso eran adecuados y que la temperatura final en el centro del producto correspondía con la establecida para cada grado de cocción independientemente del grosor de la carne. Estos resultados evidencian la utilidad de la medida en continuo de la pérdida de peso para la asistencia al cocinado.

Quinta

La carne de ternera conservada en condiciones propias del ámbito doméstico (refrigerada y congelada), presentó unos cambios de color durante el cocinado similares a los de la carne fresca (sin periodo de conservación). En consecuencia, la cinética de color obtenida para esta última puede aplicarse para predecir los cambios de color durante la cocción, independientemente del método de conservación utilizado. Sin embargo, la carne refrigerada presentó una menor capacidad de retención de agua que se manifestó durante la cocción en una mayor pérdida de peso, resultando un producto de mayor dureza y masticabilidad para tiempos de cocción prolongados.

Sexta

La evolución de la humedad y del color absoluto en los panqueques durante su calentamiento por contacto con una superficie caliente obedecen a cinéticas de primer orden, existiendo una relación lineal entre el color absoluto y la humedad durante el periodo de pérdida de agua a velocidad constante. Por otra parte, los cambios de la coordenada de color a^* se pueden describir mediante una cinética de dos reacciones irreversibles de primer orden en serie.

Séptima

Las masas de panqueques elaboradas con distintos tipos de harinas mostraron diferentes pérdidas de peso durante el cocinado. Las masas de harina de avena y de leguminosas pierden menos peso que la masa de trigo debido a su alto contenido en fibra y proteínas, mientras que las masas sin gluten, elaboradas con harina de arroz y maíz, que tienen un bajo contenido en proteínas experimentaron una mayor pérdida de peso. Estas pérdidas de peso se han podido vincular con el comportamiento reológico de las masas; en concreto, la viscosidad aparente se ha relacionado inversamente ($p < 0,01$) con la pérdida de peso de los panqueques.

Octava

El modelado de la cocción por contacto con una superficie caliente es complejo debido, entre otros motivos, a la dificultad de determinar la conductancia entre el producto y la sartén. Además, en el caso de los panqueques esa conductancia cambia con la cocción como consecuencia de la formación de la costra en la superficie en contacto con la sartén y de la modificación de las propiedades reológicas de las masas. Se ha desarrollado un modelo matemático que incorpora los cambios de esa conductancia en función de la evolución de la viscosidad de las masas con la temperatura. A su vez, la modificación de la conductancia influye en la velocidad de evaporación y por lo tanto, en la pérdida de peso.

Novena

La potencia suministrada durante el cocinado de la pasta por inmersión en agua hirviendo influye en la calidad del producto. Las pérdidas por cocción, la turbidez del agua y la gelatinización del almidón se reducen significativamente ($p < 0,05$) al disminuir la potencia, resultando una pasta más firme y menos pegajosa. Reducir la potencia también conlleva que el índice de hinchamiento y el incremento de volumen sea más bajo. Estos resultados son aplicables a pasta de diferente composición (refinada, integral y sin gluten) y forma (macarrones y espaguetis de diferentes diámetros).

Décima

Cocer la pasta con una cantidad de agua menor de lo recomendado culinariamente reduce el índice de hinchamiento, el incremento de volumen y las pérdidas por cocción mientras que aumenta la pegajosidad, siendo esta influencia más acusada a alta potencia que a baja. Como los cambios en las propiedades de cocinado y en la textura de la pasta al reducir la potencia y la cantidad de agua no son determinantes, se puede concluir que es posible minimizar el consumo energético cocinado a baja potencia y disminuyendo la relación agua/pasta sin que se produzca una pérdida significativa en la calidad del producto.

Undécima

Cocinar los vegetales a la potencia de calentamiento más baja posible para mantener la ebullición permite retener mejor los compuestos fenólicos y la capacidad antioxidante de algunos vegetales (alcachofas, acelgas y brócoli).

El seguimiento de la evolución de la conductividad eléctrica del agua de cocción ha permitido vincular estas menores pérdidas nutricionales a una disminución en la cantidad de compuestos lixiviados.

Duodécima

Los resultados obtenidos en diferentes alimentos y medios de cocción han permitido avanzar en el modelado predictivo del comportamiento de los alimentos durante su tratamiento culinario y por tanto, contribuyen al desarrollo de la asistencia al cocinado en placas de inducción.

CAPÍTULO VI

BIBLIOGRAFÍA



- AACC.** (1989). Aacc method 66-50.01. In *Pasta and Noodle Cooking Quality - Firmness*. Cereals & Grains Association, St. Paul, MN: Approved Methods of Analysis, 11th Ed.
- AACC.** (2000). *Approved methods of the aacc*. Paper presented at the 10th Edition, Cereals & Grains Association, St. Paul, MN.
- Aalami, M., Leelavathi, K., Rao, U. J. S. P.** (2007). Spaghetti making potential of indian durum wheat varieties in relation to their protein, yellow pigment and enzyme contents. *Food Chemistry*, 100(3), 1243-1248.
- Aaslyng, M. D., Bejerholm, C., Ertbjerg, P., Bertram, H. C., Andersen, H. J.** (2003). Cooking loss and juiciness of pork in relation to raw meat quality and cooking procedure. *Food Quality and Preference*, 14(4), 277-288.
- Abd Karim, A., Norziah, M. H., Seow, C. C.** (2000). Methods for the study of starch retrogradation. *Food Chemistry*, 71(1), 9-36.
- Abecassis, J., Alary, R., Kobrehel, K.** (1981). Einfluss des pH-wertes des kochwassers auf die beschaffenheit gekochter teigwaren. *Durum Teigwaren-Tag*, 178.
- Abril, M., Campo, M. M., Önenç, A., Sañudo, C., Albertí, P., Negueruela, A. I.** (2001). Beef colour evolution as a function of ultimate pH. *Meat Science*, 58(1), 69-78.
- AbuGhannam, N., McKenna, B.** (1997). The application of peleg's equation to model water absorption during the soaking of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Journal of Food Engineering*, 32(4), 391-401.
- Aguerre, R. J., Suárez, C., Viollaz, P. E.** (1989). Swelling and pore structure in starchy materials. *Journal of Food Engineering*, 9(1), 71-80.
- Aherne, S. A., O'Brien, N. M.** (2002). Dietary flavonols: Chemistry, food content, and metabolism. *Nutrition*, 18(1), 75-81.
- Ahmad, A., Anjum, F. M., Zahoor, T., Nawaz, H., Din, A.** (2009). Physicochemical and functional properties of barley beta-glucan as affected by different extraction procedures. *International Journal of Food Science and Technology*, 44(1), 181-187.
- Ahmad, S., Khan, M. A., Kamil, M.** (2015). Mathematical modeling of meat cylinder cooking. *LWT-Food Science and Technology*, 60(2), 678-683.
- Ahmed, J., Thomas, L.** (2015). Effect of beta-glucan concentrate on the water uptake, rheological and textural properties of wheat flour dough. *International Journal of Food Properties*, 18(8), 1801-1816.
- Ahrne, L., Andersson, C. G., Floberg, P., Rosen, J., Lingnert, H.** (2007). Effect of crust temperature and water content on acrylamide formation during baking of white bread: Steam and falling temperature baking. *LWT-Food Science and Technology*, 40(10), 1708-1715.

- Akerberg, A., Liljeberg, H., Bjorck, I.** (1998). Effects of amylose/amylopectin ratio and baking conditions on resistant starch formation and glycaemic indices. *Journal of Cereal Science*, 28(1), 71-80.
- Alary, R., Abecassis, J., Kobrehel, K., Feillet, P.** (1979). Influence de l'eau de cuisson, et notamment de son pH, sur les caractéristiques des pâtes alimentaires cuites. *Bull. ENSMIC*, 293, 255-262.
- Allais, I., Edoura-Gaena, R. B., Gros, J. B., Trystram, G.** (2006). Influence of egg type, pressure and mode of incorporation on density and bubble distribution of a lady finger batter. *Journal of Food Engineering*, 74(2), 198-210.
- Álvarez, C., Moran, L., Keenan, D. F., Mullen, A. M., Delgado-Pando, G.** (2019). Mechanical and biochemical methods for rigor measurement: Relationship with eating quality. *Journal of Food Quality*, 2019, 1–7
- Álvarez, M. D., Herranz, B., Fuentes, R., Cuesta, F. J., Canet, W.** (2017). Replacement of wheat flour by chickpea flour in muffin batter: Effect on rheological properties. *Journal of Food Process Engineering*, 40(2), 1-13.
- Ameur, L. A., Mathieu, O., Lalanne, V., Trystram, G., Birlouez-Aragon, I.** (2007). Comparison of the effects of sucrose and hexose on furfural formation and browning in cookies baked at different temperatures. *Food Chemistry*, 101(4), 1407-1416.
- Ameur, L. A., Trystram, G., Birlouez-Aragon, I.** (2006). Accumulation of 5-hydroxymethyl-2-furfural in cookies during the baking process: Validation of an extraction method. *Food Chemistry*, 98(4), 790-796.
- AMSA.** (1995). *American meat science association. Research guidelines for cookery, sensory evaluation, and instrumental tenderness measurements of fresh meat*. Chicago: National Live Stock and Meat Board.
- Andlauer, W., Stumpf, C., Hubert, M., Rings, A., Furst, P.** (2003). Influence of cooking process on phenolic marker compounds of vegetables. *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, 73(2), 152-159.
- Anthon, G. E., Barrett, D. M.** (2002). Kinetic parameters for the thermal inactivation of quality-related enzymes in carrots and potatoes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(14), 4119-4125.
- Antognelli, C.** (1980). The manufacture and application of pasta as a food and as a food ingredient: A review. *Journal of Food Technology*, 15(2), 125-145.
- Anton, A. A., Ross, K. A., Lukow, O. M., Fulcher, G., Arntfield, S. D.** (2008). Influence of added bean flour (*Phaseolus vulgaris* L.) on some physical and nutritional properties of wheat flour tortillas. *Food Chemistry*, 109(1), 33-41.
- AOAC.** (2002a). Official method 950.46. Moisture in meat. In *Official Methods of Analysis of AOAC International*. Gaithersburg, MD.
- AOAC.** (2002b). Official methods of analysis of the AOAC (17th edition). In *942.04 Chlorophyll in plants. Spectrophotometric method for total chlorophyll and the A and B components*. Gaithersburg (MD): Association of Analytical Communities.

- Arampath, P. C., Dekker, M.** (2021). Thermal effect, diffusion, and leaching of health-promoting phytochemicals in commercial canning process of mango (*Mangifera indica* L.) and pineapple (*Ananas comosus* L.). *Foods*, 10(1).
- Aravind, N., Sissons, M., Egan, N., Fellows, C.** (2012). Effect of insoluble dietary fibre addition on technological, sensory, and structural properties of durum wheat spaghetti. *Food Chemistry*, 130(2), 299-309.
- Armesto, J., Gomez-Limia, L., Carballo, J., Martinez, S.** (2019). Effects of different cooking methods on the antioxidant capacity and flavonoid, organic acid and mineral contents of galega kale (*Brassica oleracea* var. *Acephala* cv. *Galega*). *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 70(2), 136-149.
- Arnon, D. I.** (1949). Copper enzymes in isolated chloroplasts: Polyphenoloxidase in beta vulgaris. *Plant Physiology*, 24(1), 1-15.
- Arp, C. G., Correa, M. J., Ferrero, C.** (2021). Resistant starches: A smart alternative for the development of functional bread and other starch-based foods. *Food Hydrocolloids*, 121, 17.
- Astruc, T.** (2014). Connective tissue: Structure, function, and influence on meat quality. In Dikeman, C. D. M. (Ed.), *Encyclopedia of Meat Science* (2nd edition ed., pp. 321–328). Oxford, UK: Elsevier Ltd.
- Atkinson, F. S., Foster-Powell, K., Brand-Miller, J. C.** (2008). International tables of glycemic index and glycemic load values: 2008. *Diabetes Care*, 31(12), 2281-2283.
- Atwell, W., Hood, L. F., Lineback, D. R., Varrianomarston, E., Zobel, H. F.** (1988). The terminology and methodology associated with basic starch phenomena. *Cereal Foods World*, 33, 306-311.
- Baardseth, P., Bjerke, F., Martinsen, B. K., Skrede, G.** (2010). Vitamin C, total phenolics and antioxidative activity in tip-cut green beans (*Phaseolus vulgaris*) and swede rods (*Brassica napus* var. *napobrassica*) processed by methods used in catering. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(7), 1245-1255.
- Baixauli, R., Salvador, A., Fiszman, S. M.** (2008). Textural and colour changes during storage and sensory shelf life of muffins containing resistant starch. *European Food Research and Technology*, 226(3), 523-530.
- Barbanti, D., Pasquini, M.** (2005). Influence of cooking conditions on cooking loss and tenderness of raw and marinated chicken breast meat. *LWT-Food Science and Technology*, 38(8), 895-901.
- Barbera, S., Tassone, S.** (2006). Meat cooking shrinkage: Measurement of a new meat quality parameter. *Meat Science*, 73(3), 467-474.
- Barkeling, B., Granfelt, Y., Bjorck, I., Rossner, S.** (1995). Effects of carbohydrates in the form of pasta and bread on food intake and satiety in man. *Nutrition Research*, 15(4), 467-476.

- Barroga, C. F., Laurena, A. C., Mendoza, E. M. T.** (1985). Polyphenols in mung bean (*Vigna radiata* (L) Wilczek) - determination and removal. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 33(5), 1006-1009.
- Barros, F., Awika, J. M., Rooney, L. W.** (2012). Interaction of tannins and other sorghum phenolic compounds with starch and effects on in vitro starch digestibility. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(46), 11609-11617.
- Bartlome, L., Hoff, J.** (1972). Firming of potatoes: Biochemical effects of preheating. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 20, 266-270.
- Bayindirli, A., Khalafi, S., Yeniçeri, A.** (1995). Nonenzymatic browning in clarified apple juice at high temperatures: A response surface analysis. *Journal of Food Processing and Preservation*, 19(3), 223-227.
- Bejerholm, C., Tørngren, M. A., Aaslyng, M. D.** (2014). Cooking of meat | cooking of meat. In Dikeman, M. and Devine, C. (Eds.), *Encyclopedia of meat sciences (second edition)* (pp. 370-376). Oxford: Academic Press.
- Bekhit, A. E. A., Hopkins, D. L., Fahri, F. T., Ponnampalam, E. N.** (2013). Oxidative processes in muscle systems and fresh meat: Sources, markers, and remedies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(5), 565-597.
- Benczedi, D., Tomka, I., Escher, F.** (1998). Thermodynamics of amorphous starch-water systems. 2. Concentration fluctuations. *Macromolecules*, 31(9), 3062-3074.
- Bernhardt, S., Schlich, E.** (2006). Impact of different cooking methods on food quality: Retention of lipophilic vitamins in fresh and frozen vegetables. *Journal of Food Engineering*, 77(2), 327-333.
- Bernofsky, C., Fox, J. B., Schweigert, B. S.** (1959). Biochemistry of myoglobin. VII. The effect of cooking on myoglobin in beef muscle. *Journal of Food Science*, 24, 339-343.
- Berry, B. W., Bigner-George, M. E.** (2000). Factors affecting color properties of beef patties cooked on an outdoor gas grill. *Journal of Muscle Foods*, 11(3), 213-226.
- Berry, B. W., Bigner-George, M. E.** (2001). Postcooking temperature changes in beef patties. *Journal of Food Protection*, 64(9), 1405-1411.
- Bhattarai, R. R., Dhital, S., Mense, A., Gidley, M. J., Shi, Y. C.** (2018). Intact cellular structure in cereal endosperm limits starch digestion in vitro. *Food Hydrocolloids*, 81, 139-148.
- Bianchi, F., Tolve, R., Rainero, G., Bordiga, M., Brennan, C. S., Simonato, B.** (2021). Technological, nutritional and sensory properties of pasta fortified with agro-industrial by-products: A review. *International Journal of Food Science and Technology*, 56, 4356-4366.
- Biernacka, B., Dziki, D., Gawlik-Dziki, U., Rozylo, R.** (2021). Common wheat pasta enriched with cereal coffee: Quality and physical and functional properties. *LWT-Food Science and Technology*, 139, 110516.

- Biernacka, B., Dzik, D., Mis, A., Rudy, S., Krzykowski, A., Polak, R., Rozylo, R.** (2019). Changes in pasta properties during cooking and short-time storage. *International Agrophysics*, 33(3), 323-330.
- Bisceglia, B., Brasiello, A., Pappacena, R., Vietri, R.** (2013, 23–25 October 2013). *Food cooking process. Numerical simulation of the transport phenomena*. Paper presented at the the 2013 COMSOL Conference in Rotterdam, Rotterdam, Italy.
- Bjorck, I., Granfeldt, Y., Liljeberg, H., Tovar, J., Asp, N. G.** (1994). Food properties affecting the digestion and absorption of carbohydrates. *American Journal of Clinical Nutrition*, 59(3), 699S-705S.
- Blikra, M. J., Skipnes, D., Feyissa, A. H.** (2019). Model for heat and mass transport during cooking of cod loin in a convection oven. *Food Control*, 102, 29-37.
- Bock, J. E., Connelly, R. K., Damodaran, S.** (2013). Impact of bran addition on water properties and gluten secondary structure in wheat flour doughs studied by attenuated total reflectance fourier transform infrared spectroscopy. *Cereal Chemistry*, 90(4), 377-386.
- Bock, J. E., Damodaran, S.** (2013). Bran-induced changes in water structure and gluten conformation in model gluten dough studied by fourier transform infrared spectroscopy. *Food Hydrocolloids*, 31(2), 146-155.
- Bock, J. E., West, R., Iametti, S., Bonomi, F., Marengo, M., Seetharaman, K.** (2015). Gluten structural evolution during pasta processing of refined and whole wheat pasta from hard white winter wheat: The influence of mixing, drying, and cooking. *Cereal Chemistry*, 92(5), 460-465.
- Bonomi, F., D'Egidio, M. G., Iametti, S., Marengo, M., Marti, A., Pagani, M. A., Ragg, E. M.** (2012). Structure-quality relationship in commercial pasta: A molecular glimpse. *Food Chemistry*, 135(2), 348-355.
- Bornet, F. R. J., Jardy-Gennetier, A. E., Jacquet, N., Stowell, J.** (2007). Glycaemic response to foods: Impact on satiety and long-term weight regulation. *Appetite*, 49(3), 535-553.
- Borwankar, R. P.** (1992). Food texture and rheology: A tutorial review. *Journal of Food Engineering*, 16(1-2), 1-16.
- Bosetti, C., La Vecchia, C., Talamini, R., Simonato, L., Zambon, P., Negri, E., Trichopoulos, D., Laggiou, P., Bardini, R., Franceschi, S.** (2000). Food groups and risk of squamous cell esophageal cancer in northern Italy. *International Journal of Cancer*, 87(2), 289-294.
- Botinestean, C., Keenan, D. F., Kerry, J. P., Hamill, R. M.** (2016). The effect of thermal treatments including sous-vide, blast freezing and their combinations on beef tenderness of m. Semitendinosus steaks targeted at elderly consumers. *LWT-Food Science and Technology*, 74, 154-159.
- Bouton, P., Harris, P., Shorthose, W.** (1976). Dimensional changes in meat during cooking. *Journal of Texture Studies*, 7(2), 179-192.

- Bouton, P. E., Harris, P. V.** (1981). Changes in the tenderness of meat cooked at 50–65 °C. *Journal of Food Science*, 46(2), 475-478.
- Bowers, J. A., Craig, J. A., Kropf, D. H., Tucker, T. J.** (1987). Flavor, color, and other characteristics of beef longissimus muscle heated to seven internal temperatures between 55 °C and 85 °C. *Journal of Food Science*, 52(3), 533-536.
- Brand-Miller, J. C., Stockmann, K., Atkinson, F., Petocz, P., Denyer, G.** (2009). Glycemic index, postprandial glycemia, and the shape of the curve in healthy subjects: Analysis of a database of more than 1000 foods. *American Journal of Clinical Nutrition*, 89(1), 97-105.
- Brand, J. C., Nicholson, P. L., Thorburn, A. W., Truswell, A. S.** (1985). Food processing and the glycemic index. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 42(6), 1192-1196.
- Brauer, J., Chan-Higuera, J.** (2021). Capacidad antioxidante y mecanismo de acción de pigmentos en organismos marinos. *CienciaUAT*, 15, 186-197.
- Bravo-Nunez, A., Gomez, M.** (2019). Physicochemical properties of native and extruded maize flours in the presence of animal proteins. *Journal of Food Engineering*, 243, 49-56.
- Brennan, C. S., Blake, D. E., Ellis, P. R., Schofield, J. D.** (1996). Effects of guar galactomannan on wheat bread microstructure and on the in vitro and in vivo digestibility of starch in bread. *Journal of Cereal Science*, 24(2), 151-160.
- Broyart, B., Trystram, G., Duquenoy, A.** (1998). Predicting colour kinetics during cracker baking. *Journal of Food Engineering*, 35(3), 351-368.
- Bruneel, C., Pareyt, B., Brijs, K., Delcour, J. A.** (2010). The impact of the protein network on the pasting and cooking properties of dry pasta products. *Food Chemistry*, 120(2), 371-378.
- Buleon, A., Colonna, P., Planchot, V., Ball, S.** (1998). Starch granules: Structure and biosynthesis. *International Journal of Biological Macromolecules*, 23(2), 85-112.
- Bunea, A., Andjelkovic, M., Socaciu, C., Bobis, O., Neacsu, M., Verhe, R., Van Camp, J.** (2008). Total and individual carotenoids and phenolic acids content in fresh, refrigerated and processed spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Food Chemistry*, 108(2), 649-656.
- Bureau, S., Mouhoubi, S., Touloumet, L., Garcia, C., Moreau, F., Bedouet, V., Renard, C.** (2015). Are folates, carotenoids and vitamin c affected by cooking? Four domestic procedures are compared on a large diversity of frozen vegetables. *LWT-Food Science and Technology*, 64(2), 735-741.
- Burgos, G., Amoros, W., Munoa, L., Sosa, P., Cayhualla, E., Sanchez, C., Diaz, C., Bonierbale, M.** (2013). Total phenolic, total anthocyanin and phenolic acid concentrations and antioxidant activity of purple-fleshed potatoes as affected by boiling. *Journal of Food Composition and Analysis*, 30(1), 6-12.
- Bustos, M. C., Perez, G. T., Leon, A. E.** (2015). Structure and quality of pasta enriched with functional ingredients. *RSC Advances*, 5(39), 30780-30792.

- Cabrera-Chavez, F., de la Barca, A. M. C., Islas-Rubio, A. R., Marti, A., Marengo, M., Pagani, M. A., Bonomi, F., Iametti, S.** (2012). Molecular rearrangements in extrusion processes for the production of amaranth-enriched, gluten-free rice pasta. *LWT-Food Science and Technology*, 47(2), 421-426.
- Cafieri, S., Chillo, S., Mastromatteo, M., Suriano, N., Del Nobile, M. A.** (2008). A mathematical model to predict the effect of shape on pasta hydration kinetic during cooking and overcooking. *Journal of Cereal Science*, 48(3), 857-862.
- Cafieri, S., Mastromatteo, M., Chillo, S., Del Nobile, M. A.** (2010). Modeling the mechanical properties of pasta cooked at different times. *Journal of Food Engineering*, 100(2), 336-342.
- Camelo-Mendez, G. A., Ferruzzi, M. G., Gonzalez-Aguilar, G. A., Bello-Perez, L. A.** (2016). Carbohydrate and phytochemical digestibility in pasta. *Food Engineering Reviews*, 8(1), 76-89.
- Capuano, E., Ferrigno, A., Acampa, I., Ait-Ameur, L., Fogliano, V.** (2008). Characterization of the Maillard reaction in bread crisps. *European Food Research and Technology*, 228(2), 311-319.
- Casiraghi, M. C., Brighenti, F., Testolin, G.** (1992). Lack of effect of high temperature drying on digestibility of starch in spaghetti. *Journal of Cereal Science*, 15(2), 165-174.
- Cecchini, C., Bresciani, A., Menesatti, P., Pagani, M. A., Marti, A.** (2021). Assessing the rheological properties of durum wheat semolina: A review. *Foods*, 10(12), 2947.
- Cernela, J., Heyd, B., Keller, S., Bailleul, J. L., Maillard, M. N., Bonazzi, C., Broyart, B.** (2015). Experimental study of heat and mass transfer phenomena during the contact heating of solid food models. *Journal of Food Engineering*, 146, 99-106.
- Chandrasekaran, M.** (2012). *Valorization of food processing by-products*: 1st Edition, CRC press..
- Chang, C., Chang, W.** (1992). Effects of precooking and cooking processes on textural changes of snapbean pods. *Journal of the Chinese Agricultural Chemical Society*, 30, 43-52.
- Chang, C. Y., Lai, L. R., Chang, W. H.** (1995). Relationships between textural changes and the changes in linkages of pectic substances of sweet pepper during cooking processes, and the applicability of the models of interactions between pectin molecules. *Food Chemistry*, 53(4), 409-416.
- Chang, H. C., Carpenter, J. A., Toledo, R. T.** (1998). Modeling heat transfer during oven roasting of unstuffed turkeys. *Journal of Food Science*, 63(2), 257-261.
- Chansataporn, W., Nopharatana, M., Samuhasaneetoo, S., Siri wattanayotin, S., Tangduangdee, C.** (2019). Effects of temperature on the main intermediates and products of the maillard reaction in a chicken breast meat model system. *International Journal of Agricultural Technology*, 15(4), 539-556.

- Chao, P. C., Hsu, C. C., Yin, M. C.** (2009). Analysis of glycative products in sauces and sauce-treated foods. *Food Chemistry*, 113(1), 262-266.
- Chen, H. Q., Marks, B. P., Murphy, R. Y.** (1999). Modeling coupled heat and mass transfer for convection cooking of chicken patties. *Journal of Food Engineering*, 42(3), 139-146.
- Chen, L., Opara, U. L.** (2013). Approaches to analysis and modeling texture in fresh and processed foods - a review. *Journal of Food Engineering*, 119(3), 497-507.
- Chen, Q. M., Zhang, Y. C., Guo, Y. H., Cheng, Y. L., Qian, H., Yao, W. R., Xie, Y. F., Ozaki, Y.** (2020). Non-destructive prediction of texture of frozen/thaw raw beef by raman spectroscopy. *Journal of Food Engineering*, 266, 109693.
- Cheng, H., Song, S., Jung, E. Y., Jeong, J. Y., Joo, S. T., Kim, G. D.** (2020). Comparison of beef quality influenced by freeze-thawing among different beef cuts having different muscle fiber characteristics. *Meat Science*, 169, 108206.
- Chesterton, A. K. S., Meza, B. E., Moggridge, G. D., Sadd, P. A., Wilson, D. I.** (2011). Rheological characterisation of cake batters generated by planetary mixing: Elastic versus viscous effects. *Journal of Food Engineering*, 105(2), 332-342.
- Chhanwal, N., Indrani, D., Raghavarao, K. S. M. S., Anandharamakrishnan, C.** (2011). Computational fluid dynamics modeling of bread baking process. *Food Research International*, 44(4), 978-983.
- Chiavaro, E., Rinaldi, M., Vittadini, E., Barbanti, D.** (2009). Cooking of pork longissimus dorsi at different temperature and relative humidity values: Effects on selected physico-chemical properties. *Journal of Food Engineering*, 93(2), 158-165.
- Chillo, S., Iannetti, M., Civica, V., Suriano, N., Mastromatteo, M., Del Nobile, M. A.** (2009). A study of the relationship between the mechanical properties and the sensorial optimal cooking time of spaghetti. *Journal of Food Engineering*, 94(3-4), 222-226.
- Chillo, S., Laverse, J., Falcone, P. M., Del Nobile, M. A.** (2008). Quality of spaghetti in base amaranthus wholemeal flour added with quinoa, broad bean and chick pea. *Journal of Food Engineering*, 84(1), 101-107.
- Chin, N. L., Martin, P. J.** (2014). *Rheology of bread and other bakery products*. In Bakery Products Science and Technology, 2nd ed, Wiley Blackwell: Hoboken, NJ, USA, 453-472.
- Cho, S., Kang, S. M., Seong, P., Kang, G., Kim, Y., Kim, J., Chang, S., Park, B.** (2017). Effect of aging and freezing conditions on meat quality and storage stability of 1⁺⁺ grade Hanwoo steer beef: Implications for shelf life. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 37(3), 440-448.
- Choi, E. J., Park, H. W., Chung, Y. B., Park, S. H., Kim, J. S., Chun, H. H.** (2017). Effect of tempering methods on quality changes of pork loin frozen by cryogenic immersion. *Meat Science*, 124, 69-76.

- Choi, M. J., Abduzukhurov, T., Park, D. H., Kim, E. J., Hong, G. P.** (2018). Effects of deep freezing temperature for long-term storage on quality characteristics and freshness of lamb meat. *Korean Journal for Food Science of Animal Resources*, 38(5), 959-969.
- Christensen, L., Erthjerg, P., Aaslyng, M. D., Christensen, M.** (2011). Effect of prolonged heat treatment from 48 °C to 63 °C on toughness, cooking loss and color of pork. *Meat Science*, 88(2), 280-285.
- Christensen, M., Purslow, P. P., Larsen, L. M.** (2000). The effect of cooking temperature on mechanical properties of whole meat, single muscle fibres and perimysial connective tissue. *Meat Science*, 55(3), 301-307.
- Christiaens, S., Van Buggenhout, S., Houben, K., Fraeye, I., Van Loey, A. M., Hendrickx, M. E.** (2011). Towards a better understanding of the pectin structure-function relationship in broccoli during processing: Part I-macroscopic and molecular analyses. *Food Research International*, 44(6), 1604-1612.
- Chuah, A. M., Lee, Y. C., Yamaguchi, T., Takamura, H., Yin, L. J., Matoba, T.** (2008). Effect of cooking on the antioxidant properties of coloured peppers. *Food Chemistry*, 111(1), 20-28.
- Cimini, A., Cibelli, M., Messina, M. C., Marconi, E., Moresi, M.** (2019a). Cooking quality of commercial spaghetti: Effect of the water-to-dried pasta ratio. *European Food Research and Technology*, 245(5).
- Cimini, A., Cibelli, M., Messina, M. C., Moresi, M.** (2019b). Commercial short-cut extruded pasta: Cooking quality and carbon footprint vs. water-to-pasta ratio. *Food and Bioproducts Processing*, 116, 150-159.
- Cimini, A., Cibelli, M., Moresi, M.** (2019c). Reducing the cooking water-to-dried pasta ratio and environmental impact of pasta cooking. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(3), 1258-1266.
- Cimini, A., Cibelli, M., Taddei, A. R., Moresi, M.** (2021). Effect of cooking temperature on cooked pasta quality and sustainability. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(12), 4946-4958.
- Clarke, P., Evans, S. H.** (2016). How do cooks actually cook vegetables? A field experiment with low-income households. *Health Promotion Practice*, 17(1), 80-87.
- Clausen, I., Jakobsen, M., Erthjerg, P., Madsen, N. T.** (2009). Modified atmosphere packaging affects lipid oxidation, myofibrillar fragmentation index and eating quality of beef. *Packaging Technology and Science*, 22(2), 85-96.
- Clemente, G., Bon, J., Sanjuan, N., Mulet, A.** (2009). Determination of shrinkage function for pork meat drying. *Drying Technology*, 27(1), 143-148.
- Cocci, E., Sacchetti, G., Vallicelli, M., Angioloni, A., Rosa, M. D.** (2008). Spaghetti cooking by microwave oven: Cooking kinetics and product quality. *Journal of Food Engineering*, 85(4), 537-546.

- Cole, M. E.** (1991). Review: Prediction and measurement of pasta quality. *International Journal of Food Science and Technology*, 26(2), 133-151.
- Colle, M. J., Richard, R. P., Killinger, K. M., Bohlscheid, J. C., Gray, A. R., Loucks, W. I., Day, R. N., Cochran, A. S., Nasados, J. A., Doumit, M. E.** (2015). Influence of extended aging on beef quality characteristics and sensory perception of steaks from the gluteus medius and longissimus lumborum. *Meat Science*, 110, 32-39.
- Colonna, P., Barry, J. L., Cloarec, D., Bornet, F., Guillaud, S., Galmiche, J. P.** (1990). Enzymic susceptibility of starch from pasta. *Journal of Cereal Science*, 11(1), 59-70.
- Colonna, P., Leloup, V., Buleon, A.** (1992). Limiting factors of starch hydrolysis. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46, S17-S32.
- Conforti, F. D.** (2014). Cake manufacture. In Hui, Y. H., Corke, H., De Leyn, I., Nip, W., and Cross, N. A. (Eds.), *Bakery products: Science and technology* (pp. 563-584). Chichester, UK: Wiley-Blackwell.
- Coombs, C. E. O., Holman, B. W. B., Friend, M. A., Hopkins, D. L.** (2017). Long-term red meat preservation using chilled and frozen storage combinations: A review. *Meat Science*, 125, 84-94.
- Copeland, L., Blazek, J., Salman, H., Tang, M. C. M.** (2009). Form and functionality of starch. *Food Hydrocolloids*, 23(6), 1527-1534.
- Cross, H., Durland, P., Seideman, S.** (1986). *Sensory qualities of meat* (Series, P. J. B. Ed. B.S. Schweigert. Academic Press, Inc. Nueva York ed.).
- Cui, R. B., Zhu, F.** (2019). Physicochemical properties and bioactive compounds of different varieties of sweetpotato flour treated with high hydrostatic pressure. *Food Chemistry*, 299.
- Cunin, C., Handschin, S., Walther, P., Escher, F.** (1995). Structural changes of starch during cooking of durum wheat pasta. *Food Science and Technology-Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 28(3), 323-328.
- Cunningham, S. E., McMin, W. A. M., Magee, T. R. A., Richardson, P. S.** (2007). Modelling water absorption of pasta during soaking. *Journal of Food Engineering*, 82(4), 600-607.
- Cuq, B., Goncalves, F., Mas, J. F., Varelle, L., Abecassis, J.** (2003). Effects of moisture content and temperature of spaghetti on their mechanical properties. *Journal of Food Engineering*, 59(1), 51-60.
- Czarnowska-Kujawska, M., Draszanowska, A., Starowicz, M.** (2022). Effect of different cooking methods on the folate content, organoleptic and functional properties of broccoli and spinach. *LWT-Food Science and Technology*, 167, 113825.
- D'Egidio, M. G., De Stefanis, E., Fortini, S., Galterio, G., Nardi, S., Sgrulletta, D., Bozzini, A.** (1982). Standardization of cooking quality analysis in macaroni and pasta products. *Cereal Foods World*, 27(8), 367-368.

- D'Egidio, M., Nardi, S.** (1996). Textural measurement of cooked spaghetti. In E. Kruger, R. B. M., & J. W. Dick (Ed.), *Pasta noodle technology* (pp. 133-169). MN, USA.
- Dagerskog, M.** (1979). Pan frying of meat patties. : 1. A study of heat and mass transfer. *LWT - Food Science Technology*, 12, 217-224.
- Dalla Rosa, M., Lerici, C., Cencic, L., Pinnavaia, G.** (1989). Sul grado di gelatinizzazione dell'amido in alimenti diversi. *Tecnica Molitoria*, 40, 692-699.
- Dang, D. V. S., Bastarrachea, L. J., Martini, S., Matarneh, S. K.** (2021). Crystallization behavior and quality of frozen meat. *Foods*, 10(11).
- Datta, A. K.** (2007). Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. *Journal of Food Engineering*, 80(1), 80-95.
- Datta, A. K.** (2016). Toward computer-aided food engineering: Mechanistic frameworks for evolution of product, quality and safety during processing. *Journal of Food Engineering*, 176, 9-27.
- Day, L., Fayet, C., Homer, S.** (2013). Effect of nacl on the thermal behaviour of wheat starch in excess and limited water. *Carbohydrate Polymers*, 94(1), 31-37.
- De Arcangelis, E., Angelicola, M., Trivisonno, M. C., Iacovino, S., Falasca, L., Lafiandra, D., Sestili, F., Messina, M. C., Marconi, E.** (2022). High-amylose bread wheat and its effects on cooking quality and nutritional properties of pasta. *International Journal of Food Science & Technology*, 57(10), 6785-6794.
- De Huidobro, F. R., Miguel, E., Blazquez, B., Onega, E.** (2005). A comparison between two methods (Warner-Bratzler and texture profile analysis) for testing either raw meat or cooked meat. *Meat Science*, 69(3), 527-536.
- De La Hera, E., Oliete, B., Gomez, M.** (2013). Batter characteristics and quality of cakes made with wheat-oats flour blends. *Journal of Food Quality*, 36(2), 146-153.
- De la Peña, E., Manthey, F. A.** (2014). Ingredient composition and pasta: Water cooking ratio affect cooking properties of nontraditional spaghetti. *International Journal of Food Science and Technology*, 49(10), 2323-2330.
- De la Peña, E., Ohm, J. B., Simsek, S., Manthey, F. A.** (2015). Physicochemical changes in nontraditional pasta during cooking. *Cereal Chemistry*, 92(6), 578-587.
- De la Peña, E., Wiesenborn, D. P., Manthey, F. A.** (2014). Pasta-to-water ratio, hotplate surface temperature, and beaker material affect pasta cooking time and cooked quality. *Cereal Chemistry*, 91(5), 489-495.
- De Noni, I., Pagani, M. A.** (2010). Cooking properties and heat damage of dried pasta as influenced by raw material characteristics and processing conditions. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 465-472.
- De Pilli, T., Giuliani, R., Derossi, A., Severini, C.** (2009). Study of cooking quality of spaghetti dried through microwaves and comparison with hot air dried pasta. *Journal of Food Engineering*, 95(3), 453-459.

- De Zorzi, M., Curioni, A., Simonato, B., Giannattasio, M., Pasini, G.** (2007). Effect of pasta drying temperature on gastrointestinal digestibility and allergenicity of durum wheat proteins. *Food Chemistry*, 104(1), 353-363.
- Debbouz, A., Doetkott, C.** (1996). Effect of process variables on spaghetti quality. *Cereal Chemistry*, 73(6), 672-676.
- Decindio, B., Correra, S.** (1995). Mathematical-modeling of leavened cereal goods. *Journal of Food Engineering*, 24(3), 379-403.
- Degidio, M. G., Mariani, B. M., Nardi, S., Novaro, P., Cubadda, R.** (1990). Chemical and technological variables and their relationships - a predictive equation for pasta cooking quality *Cereal Chemistry*, 67(3), 275-281.
- Del Nobile, M. A., Baiano, A., Conte, A., Mocci, G.** (2005). Influence of protein content on spaghetti cooking quality. *Journal of Cereal Science*, 41(3), 347-356.
- Del Nobile, M. A., Buonocore, G. G., Panizza, A., Gambacorta, G.** (2003). Modeling the spaghetti hydration kinetics during cooking and overcooking. *Journal of Food Science*, 68(4), 1316-1323.
- Del Nobile, M. A., Massera, M.** (2000). Modeling of water sorption kinetics in spaghetti during overcooking. *Cereal Chemistry*, 77(5), 615-619.
- Delchier, N., Reich, M., Renard, C.** (2012). Impact of cooking methods on folates, ascorbic acid and lutein in green beans (*Phaseolus vulgaris*) and spinach (*Spinacea oleracea*). *LWT-Food Science and Technology*, 49(2), 197-201.
- Delcour, J., Hoseney, R. C.** (2010). *Principles of cereal science and technology* (3rd ed. ed.). St. Paul, MN, USA: AACC International.
- Delcour, J. A., Vansteelandt, J., Hythier, M. C., Abecassis, J.** (2000). Fractionation and reconstitution experiments provide insight into the role of starch gelatinization and pasting properties in pasta quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(9), 3774-3778.
- Delgado-Andrade, C., Seiquer, I., Haro, A., Castellano, R., Navarro, M. P.** (2010). Development of the mail lard reaction in foods cooked by different techniques. Intake of maillard-derived compounds. *Food Chemistry*, 122(1), 145-153.
- Dexter, J., Dronzek, B., Matsuo, R.** (1978). Scanning electron microscopy of cooked spaghetti. *Cereal Chemistry*, 55(1), 23-30.
- Dexter, J. E., Matsuo, R. R.** (1977). Influence of protein content on some durum wheat quality parameters. *Canadian Journal of Plant Science*, 57(3), 717-727.
- Dexter, J. E., Matsuo, R. R., Macgregor, A. W.** (1985). Relationship of instrumental assessment of spaghetti cooking quality to the type and the amount of material rinsed from cooked spaghetti. *Journal of Cereal Science*, 3(1), 39-53.
- Dexter, J. E., Matsuo, R. R., Morgan, B. C.** (1983). Spaghetti stickiness - some factors influencing stickiness and relationship to other cooking quality characteristics. *Journal of Food Science*, 48(5), 1545-1551.

- Dhall, A., Datta, A. K.** (2011). Transport in deformable food materials: A poromechanics approach. *Chemical Engineering Science*, 66(24), 6482-6497.
- Dhital, S., Bhattarai, R. R., Gorham, J., Gidley, M. J.** (2016). Intactness of cell wall structure controls the in vitro digestion of starch in legumes. *Food & Function*, 7(3), 1367-1379.
- Diamante, G., Peressini, D., Simonato, M., Anese, M.** (2019). Effect of continuous cooking on cooking water properties and pasta quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(6), 3017-3023.
- Diantom, A., Curti, E., Carini, E., Boukid, F., Mattarozzi, M., Vodovotz, Y., Careri, M., Vittadini, E.** (2019). A multi-scale approach for pasta quality features assessment. *LWT-Food Science and Technology*, 101, 285-292.
- Dick, J., Youngs, V.** (1988). Evaluation of durum wheat, semolina, and pasta in the united states. In Lintas, G. F. a. C. (Ed.), *Durum wheat, chemistry and technology* (pp. 238-248). AACC Press, St. Pau.
- Djomdi, Ejoh, R., Ndjouenkeu, R.** (2007). Soaking behaviour and milky extraction performance of tiger nut (*Cyperus esculentus*) tubers. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 546-550.
- Dobiáš, J., Voldřich, M., Čurda, D.** (2006). Heating of canned fruits and vegetables: Deaeration and texture changes. *Journal of Food Engineering*, 77(3), 421-425.
- Dobraszczyk, B. J., Morgenstern, M.** (2003). Rheology and the breadmaking process. *Journal of Cereal Science*, 38(3), 229-245.
- Doesburg, J. J.** (1965). *Pectic substances in fresh and preserved fruits and vegetables* (Vol. 21). Wageningen: I.B.V.T.
- Dogan, H., Karwe, M. V.** (2003). Physicochemical properties of quinoa extrudates. *Food Science and Technology International*, 9(2), 101-114.
- Dominguez, R., Gomez, M., Fonseca, S., Lorenzo, J. M.** (2014). Effect of different cooking methods on lipid oxidation and formation of volatile compounds in foal meat. *Meat Science*, 97(2), 223-230.
- Donovan, J. W.** (1977). A study of the baking process by differential scanning calorimetry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 28(6), 571-578.
- Du, C. J., Sun, D. W.** (2005). Correlating shrinkage with yield, water content and texture of pork ham by computer vision. *Journal of Food Process Engineering*, 28(3), 219-232.
- Dubost, A., Micol, D., Picard, B., Lethias, C., Andueza, D., Bauchart, D., Listrat, A.** (2013). Structural and biochemical characteristics of bovine intramuscular connective tissue and beef quality. *Meat Science*, 95(3), 555-561.
- Dundar, E., Turan, Y., Blaurock, A. E.** (2009). Large scale structure of wheat, rice and potato starch revealed by ultra small angle X-ray diffraction. *International Journal of Biological Macromolecules*, 45(2), 206-212.

- Duszkiewiczreinhard, W., Khan, K., Dick, J. W., Holm, Y.** (1988). Shelf life stability of spaghetti fortified with legume flours and protein concentrates. *Cereal Chemistry*, 65(4), 278-281.
- Dziki, D., Laskowski, J.** (2005). Evaluation of the cooking quality of spaghetti. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 55(2), 153-158.
- Echavarria, A. P., Pagan, J., Ibarz, A.** (2012). Melanoidins formed by Maillard reaction in food and their biological activity. *Food Engineering Reviews*, 4(4), 203-223.
- Edwards, N. M., Izydorczyk, M. S., Dexter, J. E., Biliaderis, C. G.** (1993). Cooked pasta texture - comparison of dynamic viscoelastic properties to instrumental assessment of firmness. *Cereal Chemistry*, 70(2), 122-126.
- Edwards, N. M., Mulvaney, S. J., Scanlon, M. G., Dexter, J. E.** (2003). Role of gluten and its components in determining durum semolina dough viscoelastic properties. *Cereal Chemistry*, 80(6), 755-763.
- Eheart, M. S., Odland, D.** (1973). Use of ammonium compounds for chlorophyll retention in frozen green vegetables. *Journal of Food Science*, 38(12), 202-205.
- Ellis, R. P., Cochrane, M. P., Dale, M. F. B., Duffus, C. M., Lynn, A., Morrison, I. M., Prentice, R. D. M., Swanston, J. S., Tiller, S. A.** (1998). Starch production and industrial use. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 77(3), 289-311.
- Elshahat, S., Woodside, J. V., McKinley, M. C.** (2019). "Meat thermometer usage amongst european and north american consumers: A scoping review". *Food Control*, 106.
- Elshimi, N. M.** (1992). Influence of microwave and conventional cooking and reheating on sensory and chemical characteristics of roast beef. *Food Chemistry*, 45(1), 11-14.
- Englyst, H. N., Kingman, S. M., Cummings, J. H.** (1992). Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *European Journal of Clinical Nutrition*, 46, S33-S50.
- Erdogdu, F.** (2005). Mathematical approaches for use of analytical solutions in experimental determination of heat and mass transfer parameters. *Journal of Food Engineering*, 68(2), 233-238.
- Erdogdu, S. B., Erdogan, F., Ekiz, H. I.** (2007). Influence of sodium tripolyphosphate (STP) treatment and cooking time on cook losses and textural properties of red meats. *Journal of Food Process Engineering*, 30(6), 685-700.
- Ermişer, D., Yalçın, E.** (2021). Dietary fibre, protein profile and technological characteristics of durum spaghetti enriched with refined / whole grain hull-less barley flour. *Journal of Cereal Science*, 102, 103315.
- Ertbjerg, P., Puolanne, E.** (2017). Muscle structure, sarcomere length and influences on meat quality: A review. *Meat Science*, 132, 139-152.

- Espinosa-Solis, V., Zamudio-Flores, P. B., Tirado-Gallegos, J. M., Ramirez-Mancinas, S., Olivas-Orozco, G. I., Espino-Diaz, M., Hernandez-Gonzalez, M., Garcia-Cano, V. G., Sanchez-Ortiz, O., Buenrostro-Figueroa, J. J., Baeza-Jimenez, R. (2019). Evaluation of cooking quality, nutritional and texture characteristics of pasta added with oat bran and apple flour. *Foods*, 8(8), 299.
- Esteller, M. S., Orlandi de Lima, A. C., da Silva Lannes, S. C. (2006). Color measurement in hamburger buns with fat and sugar replacers. *LWT - Food Science and Technology*, 39(2), 184-187.
- Evans, I. D. (1986). An investigation of starch/surfactant interactions using viscosimetry and differential scanning calorimetry. *Starch-Starke*, 38(7), 227-235.
- Faller, A. L. K., Fialho, E. (2009). The antioxidant capacity and polyphenol content of organic and conventional retail vegetables after domestic cooking. *Food Research International*, 42(1), 210-215.
- Fardet, A., Baldwin, P. M., Bertrand, D., Bouchet, B., Gallant, D. J., Barry, J.-L. (1998a). Textural images analysis of pasta protein networks to determine influence of technological processes. *Cereal Chemistry*, 75(5), 699-704.
- Fardet, A., Hoebler, C., Baldwin, P. M., Bouchet, B., Gallant, D. J., Barry, J. L. (1998b). Involvement of the protein network in the in vitro degradation of starch from spaghetti and lasagne: A microscopic and enzymic study. *Journal of Cereal Science*, 27(2), 133-145.
- Faustman, C., Cassens, R. G. (1990). The biochemical basis for discoloration in fresh meat: A review. *Journal of Muscle Foods*, 1(3), 217-243.
- Faustman, C., Suman, S. P. (2017). The eating quality of meat: I-Color. In Toldra', F. (Ed.), *Lawrie's meat science (eighth edition)* (pp. 329-356): Woodhead Publishing.
- Fay, L. B., Brevard, H. (2005). Contribution of mass spectrometry to the study of the Maillard reaction in food. *Mass Spectrometry Reviews*, 24(4), 487-507.
- Feillet, P., Aitmouh, O., Kobrehel, K., Autran, J. C. (1989). The role of low molecular weight glutenin proteins in the determination of cooking quality of pasta products: An overview. *Cereal Chemistry*, 66(1), 26-30.
- Fellows, P. J. (2017). 16 - Baking and roasting. In Fellows, P. J. (Ed.), *Food processing technology (fourth edition)* (pp. 733-752): Woodhead Publishing.
- Fennema, O. R. (1992). *Química de los alimentos*. Zaragoza, España Acribia.
- Fennema, O. R., Damodaran, S., Parking, K. L.,. (2010). *Química de los alimentos* (SA, E. A. Ed. Tercera edición ed.).
- Fernández, P. P., Sanz, P. D., Molina-García, A. D., Otero, L., Guignon, B., Vaudagna, S. R. (2007). Conventional freezing plus high pressure-low temperature treatment: Physical properties, microbial quality and storage stability of beef meat. *Meat Science*, 77(4), 616-625.

- Ferracane, R., Pellegrini, N., Visconti, A., Graziani, G., Chiavaro, E., Miglio, C., Fogliano, V.** (2008). Effects of different cooking methods on antioxidant profile, antioxidant capacity, and physical characteristics of artichoke. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(18), 8601-8608.
- Feyissa, A. H., Gernaey, K. V., Adler-Nissen, J.** (2013). 3D modelling of coupled mass and heat transfer of a convection-oven roasting process. *Meat Science*, 93(4), 810-820.
- Feyissa, A. H., Gernaey, K. V., Ashokkumar, S., Adler-Nissen, J.** (2011). Modelling of coupled heat and mass transfer during a contact baking process. *Journal of Food Engineering*, 106(3), 228-235.
- Fidalgo, L. G., Simões, M. M. Q., Casal, S., Lopes-da-Silva, J. A., Carta, A. M. S., Delgadillo, I., Saraiva, J. A.** (2020). Physicochemical parameters, lipids stability, and volatiles profile of vacuum-packaged fresh Atlantic salmon (*Salmo salar*) loins preserved by hyperbaric storage at 10 °C. *Food Res Int*, 127, 108740.
- Findlay, C. J., Parkin, K. L., Stanley, D. W.** (1986). Differential scanning calorimetry can determine kinetics of thermal-denaturation of beef muscle proteins. *Journal of Food Biochemistry*, 10(1), 1-15.
- Findlay, C. J., Stanley, D. W.** (1984). Differential scanning calorimetry of beef muscle - influence of sarcomere-length. *Journal of Food Science*, 49(6), 1529-1534.
- Font-I-Furnols, M., Guerrero, L.** (2014). Consumer preference, behavior and perception about meat and meat products: An overview. *Meat Science*, 98(3), 361-371.
- Fowler, A. J., Bejan, A.** (1991). The effect of shrinkage on the cooking of meat. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 12(4), 375-383.
- Fraeye, I., Duvetter, T., Verlent, I., Sila, D. N., Hendrickx, M., Van Loey, A.** (2007). Comparison of enzymatic de-esterification of strawberry and apple pectin at elevated pressure by fungal pectinmethylesterase. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 8(1), 93-101.
- Freitas, P., Pereira, S. A., Santos, M. D., Alves, S. P., Bessa, R. J. B., Delgadillo, I., Saraiva, J. A.** (2016). Performance of raw bovine meat preservation by hyperbaric storage (*quasi* energetically costless) compared to refrigeration. *Meat Science*, 121, 64-72.
- French, D.** (1984). Organization of starch granules. In Whistler, R. L., BeMiller, J. N., and Pascha, E. F. (Eds.), *Starch: Chemistry and technology* (pp. 183-247). Starch chemistry and technology: Elsevier.
- Fu, B. X.** (2008). Asian noodles: History, classification, raw materials, and processing. *Food Research International*, 41(9), 888-902.
- Fukuoka, M., Ohta, K., Watanabe, H.** (2002). Determination of the terminal extent of starch gelatinization in a limited water system by dsc. *Journal of Food Engineering*, 53(1), 39-42.

- Galloway, G. I., Biliaderis, C. G., Stanley, D. W. (1989). Properties and structure of amylose–glyceryl monostearate complexes formed in solution or on extrusion of wheat flour. *Journal of Food Science*, 54(4), 950-957.
- Gan, Z., Ellis, P. R., Vaughan, J. G., Galliard, T. (1989). Some effects of non-endosperm components of wheat and of added gluten on wholemeal bread microstructure. *Journal of Cereal Science*, 10(2), 81-91.
- Garcia-Pascual, P., Sanjuan, N., Melis, R., Mulet, A. (2006). *Morchella esculenta* (morel) rehydration process modelling. *Journal of Food Engineering*, 72(4), 346-353.
- Garcia-Segovia, P., Andres-Bello, A., Martinez-Monzo, J. (2007). Effect of cooking method on mechanical properties, color and structure of beef muscle (*M. pectoralis*). *Journal of Food Engineering*, 80(3), 813-821.
- Geileskey, A., King, R. D., Corte, D., Pinto, P., Ledward, D. A. (1998). The kinetics of cooked meat haemoprotein formation in meat and model systems. *Meat Science*, 48(3-4), 189-199.
- Geisslitz, S., Longin, C. F. H., Scherf, K. A., Koehler, P. (2019). Comparative study on gluten protein composition of ancient (einkorn, emmer and spelt) and modern wheat species (durum and common wheat). *Foods*, 8(9).
- Gelencser, T., Gal, V., Salgo, A. (2010). Effects of applied process on the in vitro digestibility and resistant starch content of pasta products. *Food and Bioprocess Technology*, 3(4), 491-497.
- Giambanelli, E., Verkerk, R., D'Antuono, L. F., Oliviero, T. (2016). The kinetic of key phytochemical compounds of non-heading and heading leafy Brassica oleracea landraces as affected by traditional cooking methods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(14), 4772-4784.
- Gibson, L. J., Ashby, M. F. (1997). *Cellular solids: Structure and properties* (2 ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Gil, M. I., Tomas-Barberan, F. A., Hess-Pierce, B., Holcroft, D. M., Kader, A. A. (2000). Antioxidant activity of pomegranate juice and its relationship with phenolic composition and processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(10), 4581-4589.
- Godefroidt, T., Ooms, N., Pareyt, B., Brijs, K., Delcour, J. A. (2019). Ingredient functionality during foam-type cake making: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(5), 1550-1562.
- Godet, M. C., Tran, V., Colonna, P., Buleon, A., Pezolet, M. (1995). Inclusion exclusion of fatty acids in amylose complexes as a function of the fatty acid chain length. *International Journal of Biological Macromolecules*, 17(6), 405-408.
- Goesaert, H., Brijs, K., Veraverbeke, W. S., Courtin, C. M., Gebruers, K., Delcour, J. A. (2005). Wheat flour constituents: How they impact bread quality, and how to impact their functionality. *Trends in Food Science & Technology*, 16(1-3), 12-30.

- Gokmen, V., Acar, O. C., Arribas-Lorenzo, G., Morales, F. J.** (2008). Investigating the correlation between acrylamide content and browning ratio of model cookies. *Journal of Food Engineering*, 87(3), 380-385.
- Gökmen, V., Şenyuva, H. Z.** (2006). Study of colour and acrylamide formation in coffee, wheat flour and potato chips during heating. *Food Chemistry*, 99(2), 238-243.
- Gomez, M., Manchon, L., Oliete, B., Ruiz, E., Caballero, P. A.** (2010). Adequacy of wholegrain non-wheat flours for layer cake elaboration. *LWT-Food Science and Technology*, 43(3), 507-513.
- Goncalves, E. M., Pinheiro, J., Abreu, M., Brandao, T. R. S., Silva, C. L. M.** (2010). Carrot (*daucus carota* L.) peroxidase inactivation, phenolic content and physical changes kinetics due to blanching. *Journal of Food Engineering*, 97(4), 574-581.
- Gonnella, M., Durante, M., Caretto, S., D'Imperio, M., Renna, M.** (2018). Quality assessment of ready-to-eat asparagus spears as affected by conventional and *sous-vide* cooking methods. *LWT-Food Science and Technology*, 92, 161-168.
- Gonzalez, R. J., Livore, A., Pons, B.** (2004). Physico-chemical and cooking characteristics of some rice varieties. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 47(1), 71-76.
- Goñi, S. M., Salvadori, V. O.** (2010). Prediction of cooking times and weight losses during meat roasting. *Journal of Food Engineering*, 100(1), 1-11.
- Goñi, S. M., Salvadori, V. O.** (2011). Kinetic modelling of colour changes during beef roasting. In Saravacos, G., Taoukis, P., Krokida, M., Karathanos, V., Lazarides, H., Stoforos, N., Tzia, C., and Yanniotis, S. (Eds.), *11th international congress on engineering and food* (Vol. 1, pp. 1039-1044).
- Granfeldt, Y., Bjorck, I.** (1991). Glycemic response to starch in pasta: A study of mechanisms of limited enzyme availability. *Journal of Cereal Science*, 14(1), 47-61.
- Granfeldt, Y., Bjorck, I., Hagander, B.** (1991). On the importance of processing conditions, product thickness and egg addition for the glycaemic and hormonal responses to pasta: A comparison with bread made from pastas ingredients. *European Journal of Clinical Nutrition*, 45(10), 489-499.
- Grayson, A. L., King, D. A., Shackelford, S. D., Koohmaraie, M., Wheeler, T. L.** (2014). Freezing and thawing or freezing, thawing, and aging effects on beef tenderness. *Journal of Animal Science*, 92(6), 2735-2740.
- Grzybowski, R. A., Donnelly, B. J.** (1979). Cooking properties of spaghetti - factors affecting cooking quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 27(2), 380-384.
- Guadarrama-Lezama, A. Y., Carrillo-Navas, H., Perez-Alonso, C., Vernon-Carter, E. J., Alvarez-Ramirez, J.** (2016). Thermal and rheological properties of sponge cake batters and texture and microstructural characteristics of sponge cake made with native corn starch in partial or total replacement of wheat flour. *LWT-Food Science and Technology*, 70, 46-54.

- Guessasma, S., Chaunier, L., Della Valle, G., Lourdin, D.** (2011). Mechanical modelling of cereal solid foods. *Trends in Food Science & Technology*, 22(4), 142-153.
- Guibert-Martin, S., Jury, V., Bouchet, B., Roellens, G., LioRET, P., Le -Bail, A.** (2017). Impact of the baking protocol on the structure of french crepes. *Journal of Food Engineering*, 196, 183-192.
- Guida, V., Ferrari, G., Pataro, G., Chambery, A., Di Maro, A., Parente, A.** (2013). The effects of ohmic and conventional blanching on the nutritional, bioactive compounds and quality parameters of artichoke heads. *LWT-Food Science and Technology*, 53(2), 569-579.
- Guillen, S., Mir-Bel, J., Oria, R., Salvador, M. L.** (2017). Influence of cooking conditions on organoleptic and health-related properties of artichokes, green beans, broccoli and carrots. *Food Chemistry*, 217, 209-216.
- Guillen, S., Oria, R., Salvador, M. L.** (2018). Impact of cooking temperature on in vitro starch digestibility of rice varieties with different amylose contents. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 68(4), 319-325.
- Gularte, M. A., de la Hera, E., Gomez, M., Rosell, C. M.** (2012). Effect of different fibers on batter and gluten-free layer cake properties. *LWT-Food Science and Technology*, 48(2), 209-214.
- Gupta, T. R.** (2001). Individual heat transfer modes during contact baking of indian unleavened flat bread (*chapati*) in a continuous oven. *Journal of Food Engineering*, 47(4), 313-319.
- Guzel, D., Sayar, S.** (2012). Effect of cooking methods on selected physicochemical and nutritional properties of barlotto bean, chickpea, faba bean, and white kidney bean. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 49(1), 89-95.
- Haisman, D. R., Clarke, M. W.** (1975). The interfacial factor in the heat-induced conversion of chlorophyll to pheophytin in green leaves. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 26(8), 1111-1126.
- Hamdy, O., Abdel-Salam, Z., Abdel-Harith, M.** (2020). Discrimination between fresh, chilled, and frozen/thawed chicken based on its skin's spectrochemical and optical properties. *Analytical Methods*, 12(16), 2093-2101.
- Hamm, R.** (1961). Biochemistry of meat hydration. In *Advances in food research* (Vol. 10, pp. 355-463): Elsevier.
- Hanschen, F. S., Kühn, C., Nickel, M., Rohn, S., Dekker, M.** (2018). Leaching and degradation kinetics of glucosinolates during boiling of brassica oleracea vegetables and the formation of their breakdown products. *Food Chemistry*, 263, 240-250.
- Haralampu, S. G.** (2000). Resistant starch - a review of the physical properties and biological impact of RS₃. *Carbohydrate Polymers*, 41(3), 285-292.
- Hashiba, H.** (1982). The browning reaction of amadori compounds derived from various sugars. *Agricultural and Biological Chemistry*, 46(2), 547-548.

- Hasjim, J., Ai, Y., Jane, J. L.** (2013). Novel applications of amylose-lipid complex as resistant starch type 5. In Shi, Y.-C. and Maningat, C. C. (Eds.), *Resistant starch sources, applications and health benefits* (pp. 79-94). Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- Hasjim, J., Lee, S. O., Hendrich, S., Setiawan, S., Ai, Y. F., Jane, J. L.** (2010). Characterization of a novel resistant-starch and its effects on postprandial plasma-glucose and insulin responses. *Cereal Chemistry*, 87(4), 257-262.
- Hearne, L. E., Penfield, M. P., Goertz, G. E.** (1978). Heating effects on bovine semitendinosus: Shear, muscle fiber measurements, and cooking losses. *Journal of Food Science*, 43(1), 10-12.
- Hedayati, S., Tehrani, M. M.** (2018). Effect of total replacement of egg by soymilk and lecithin on physical properties of batter and cake. *Food Science & Nutrition*, 6(4), 1154-1161.
- Heneen, W. K., Brismar, K.** (2003). Structure of cooked spaghetti of durum and bread wheats. *Starch-Starke*, 55(12), 546-557.
- Hergenreder, J. E., Hosch, J. J., Varnold, K. A., Haack, A. L., Senaratne, L. S., Pokharel, S., Beauchamp, C., Lobaugh, B., Calkins, C. R.** (2013). The effects of freezing and thawing rates on tenderness, sensory quality, and retail display of beef subprimals. *Journal of Animal Science*, 91(1), 483-490.
- Hesso, N., Loisel, C., Chevallier, S., Marti, A., Le-Bail, P., Le-Bail, A., Seetharaman, K.** (2015). The role of ingredients on thermal and rheological properties of cake batters and the impact on microcake texture. *LWT-Food Science and Technology*, 63(2), 1171-1178.
- Hodge, J. E.** (1953). Chemistry of browning reactions in model systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1(15), 928-943.
- Holm, J., Bjorck, I.** (1988). Effects of thermal processing of wheat on starch. II. Enzymic availability. *Journal of Cereal Science*, 8(3), 261-268.
- Hood, D., Riordan, E.** (1973). Discolouration in pre-packaged beef: Measurement by reflectance spectrophotometry and shopper discrimination. *International Journal of Food Science and Technology*, 8(3), 333-343.
- Hood, D. E.** (1980). Factors affecting the rate of metmyoglobin accumulation in pre-packaged beef. *Meat Science*, 4(4), 247-265.
- Hoogzand, C., Doesburg, J. J.** (1961). Effect of blanching on texture and pectin of cauliflower. *Food Technology*, 15(3), 160-163.
- Hopia, A., Fooladi, E.** (2019). Tempering the meat before cooking, ...or maybe not. In *A pinch of culinary science* (pp. 119-124).
- Hu, X., Gu, T., Khan, I., Zada, A., Jia, T.** (2021). Research progress in the interconversion, turnover and degradation of chlorophyll. *Cells*, 10(11), 3134.

- Huang, M., Yang, H. S.** (2019). Eucheuma powder as a partial flour replacement and its effect on the properties of sponge cake. *LWT-Food Science and Technology*, 110, 262-268.
- Huang, M., Zhao, L., Yang, H. S.** (2021). Water loss and status in sponge cake: Impact of Eucheuma as a flour replacement. *Journal of Food Science*, 86(3), 915-922.
- Hughes, J. M., Clarke, F., Purslow, P., Warner, R.** (2017). High pH in beef *longissimus thoracis* reduces muscle fibre transverse shrinkage and light scattering which contributes to the dark colour. *Food Research International*, 101, 228-238.
- Hughes, J. M., McPhail, N. G., Kearney, G., Clarke, F., Warner, R. D.** (2015). Beef *longissimus* eating quality increases up to 20 weeks of storage and is unrelated to meat colour at carcass grading. *Animal Production Science*, 55(2), 174-179.
- Hughes, J. M., Oiseth, S. K., Purslow, P. P., Warner, R. D.** (2014). A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness. *Meat Science*, 98(3), 520-532.
- Hull, G. L. J., Woodside, J. V., Ames, J. M., Cuskelly, G. J.** (2012). N^ε-(carboxymethyl)lysine content of foods commonly consumed in a Western style diet. *Food Chemistry*, 131(1), 170-174.
- Hunt, M. C., Hedrick, H. B.** (1977). Chemical, physical and sensory characteristics of bovine muscle from 4 quality groups. *Journal of Food Science*, 42(3), 716-720.
- Hunt, M. C., Sorheim, O., Slinde, E.** (1999). Color and heat denaturation of myoglobin forms in ground beef. *Journal of Food Science*, 64(5), 847-851.
- Ibarz, A., Pagan, J., Garza, S.** (2000). Kinetic models of non-enzymatic browning in apple puree. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80(8), 1162-1168.
- Iribe-Salazar, R., Gutierrez-Dorado, R., Rios-Iribe, E., Carrasco-Escalante, M., Vazquez-Lopez, Y., Hernandez-Calderon, O., Caro-Corrales, J.** (2018). Modeling of effective moisture diffusivity in corn tortilla baking. *Journal of Food Science*, 83(8), 2167-2175.
- Isleroglu, H., Kemerli, T., Sakin-Yilmazer, M., Guven, G., Ozdestan, O., Uren, A., Kaymak-Ertekin, F.** (2012). Effect of steam baking on acrylamide formation and browning kinetics of cookies. *Journal of Food Science*, 77(10), E257-E263.
- Ismail, A., Marjan, Z. M., Foong, C. W.** (2004). Total antioxidant activity and phenolic content in selected vegetables. *Food Chemistry*, 87(4), 581-586.
- Jang, H. L., Bae, I. Y., Lee, H. G.** (2015). In vitro starch digestibility of noodles with various cereal flours and hydrocolloids. *LWT-Food Science and Technology*, 63(1), 122-128.
- Janicki, L. J., Appledorf, H.** (1974). Effect of broiling, grill frying and microwave cooking on moisture, some lipid components and total fatty acids of ground beef. *Journal of Food Science*, 39(4), 715-717.

- Jenkins, D. J. A., Wolever, T. M. S., Jenkins, A. L., Lee, R., Wong, G. S., Josse, R.** (1983). Glycemic response to wheat products: Reduced response to pasta, but no effect of fibre. *Diabetes Care*, 6(2), 155-159.
- Jenkins, D. J. A., Wolever, T. M. S., Taylor, R. H., Barker, H., Fielden, H., Baldwin, J. M., Bowling, A. C., Newman, H. C., Jenkins, A. L., Goff, D. V.** (1981). Glycemic index of foods: A physiological basis for carbohydrate exchange. *American Journal of Clinical Nutrition*, 34(3), 362-366.
- Jiménez-Monreal, A. M., Garcia-Diz, L., Martínez-Tomé, M., Mariscal, M., Murcia, M. A.** (2009). Influence of cooking methods on antioxidant activity of vegetables. *Journal of Food Science*, 74(3), H97-H103.
- Jowitt, R.** (1979). *Food texture and rheology* (Sherman, P. Ed.). London: Academic press.
- Juániz, I., Ludwig, I. A., Huarte, E., Pereira-Caro, G., Moreno-Rojas, J. M., Cid, C., De Pena, M. P.** (2016). Influence of heat treatment on antioxidant capacity and (poly)phenolic compounds of selected vegetables. *Food Chemistry*, 197, 466-473.
- Kalichevsky, M. T., Ring, S. G.** (1987). Incompatibility of amylose and amylopectin in aqueous solution. *Carbohydrate Research*, 162(2), 323-328.
- Kang, J. H., Song, K. B.** (2021). Antimicrobial activity of honeybush (*Cyclopia intermedia*) ethanol extract against foodborne pathogens and its application in washing fresh-cut swiss chard. *Food Control*, 121, 107674.
- Kanzler, C., Haase, P. T.** (2020). Melanoidins formed by heterocyclic maillard reaction intermediates via aldol reaction and michael addition. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(1), 332-339.
- Karkalas, J., Ma, S., Morrison, W. R., Pethrick, R. A.** (1995). Some factors determining the thermal properties of amylose inclusion complexes with fatty acids. *Carbohydrate Research*, 268(2), 233-247.
- Katekawa, M. E., Silva, M. A.** (2006). A review of drying models including shrinkage effects. *Drying Technology*, 24(1), 5-20.
- Kaur, G., Sharma, S., Nagi, H. P. S., Dar, B. N.** (2012). Functional properties of pasta enriched with variable cereal brans. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 49(4), 467-474.
- Kaur, G., Sharma, S., Nagi, H. P. S., Ranote, P. S.** (2013). Enrichment of pasta with different plant proteins. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 50(5), 1000-1005.
- Kaur, M., Singh, N.** (2005). Studies on functional, thermal and pasting properties of flours from different chickpea (*Cicer arietinum L.*) cultivars. *Food Chemistry*, 91(3), 403-411.
- Kaushal, P., Kumar, V., Sharma, H. K.** (2012). Comparative study of physicochemical, functional, antinutritional and pasting properties of taro (*Colocasia esculenta*), rice (*Oryza sativa*) flour, pigeonpea (*Cajanus cajan*) flour and their blends. *LWT-Food Science and Technology*, 48(1), 59-68.

- Kayacier, A., Singh, R. K.** (2003). Textural properties of baked tortilla chips. *LWT - Food Science and Technology*, 36(5), 463-466.
- Khoozani, A. A., Bekhit, A. E. A., Birch, J.** (2019). Effects of different drying conditions on the starch content, thermal properties and some of the physicochemical parameters of whole green banana flour. *International Journal of Biological Macromolecules*, 130, 938-946.
- Killinger, K. M., Hunt, M. C., Campbell, R. E., Kropf, D. H.** (2000). Factors affecting premature browning during cooking of store-purchased ground beef. *Journal of Food Science*, 65(4), 585-587.
- Kim, G.-D., Jung, E.-Y., Lim, H.-J., Yang, H.-S., Joo, S.-T., Jeong, J.-Y.** (2013). Influence of meat exudates on the quality characteristics of fresh and freeze-thawed pork. *Meat Science*, 95(2), 323-329.
- Kim, H. S., Kim, B. Y., Baik, M. Y.** (2012). Application of ultra high pressure (UHP) in starch chemistry. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 52(1-3), 123-141.
- Kim, Y. H. B., Frandsen, M., Rosenvold, K.** (2011). Effect of ageing prior to freezing on colour stability of ovine *longissimus* muscle. *Meat Science*, 88(3), 332-337.
- Kim, Y. H. B., Warner, R. D., Rosenvold, K.** (2014). Influence of high pre-rigor temperature and fast pH fall on muscle proteins and meat quality: A review. *Animal Production Science*, 54(4), 375-395.
- King, D. A., Shackelford, S. D., Rodriguez, A. B., Wheeler, T. L.** (2011). Effect of time of measurement on the relationship between metmyoglobin reducing activity and oxygen consumption to instrumental measures of beef longissimus color stability. *Meat Science*, 87(1), 26-32.
- King, N. J., Whyte, R.** (2006). Does it look cooked? A review of factors that influence cooked meat color. *Journal of Food Science*, 71(4), R31-R40.
- Kocer, D., Hicsasmaz, Z., Bayindirli, A., Katnas, S.** (2007). Bubble and pore formation of the high-ratio cake formulation with polydextrose as a sugar- and fat-replacer. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 953-964.
- Kondjoyan, A., Kohler, A., Realini, C. E., Portanguen, S., Kowalski, R., Clerjon, S., Gatellier, P., Chevolleau, S., Bonny, J. M., Debrauwer, L.** (2014). Towards models for the prediction of beef meat quality during cooking. *Meat Science*, 97(3), 323-331.
- Kondjoyan, A., Oillic, S., Portanguen, S., Gros, J. B.** (2013). Combined heat transfer and kinetic models to predict cooking loss during heat treatment of beef meat. *Meat Science*, 95(2), 336-344.
- Kong, F., Singh, R. P.** (2016). Chemical deterioration and physical instability of foods and beverages. In Subramaniam, P. (Ed.), *Stability and shelf life of food*, 2nd edition (Vol. 297, pp. 43-76).
- Krolikowska, K., Cervenka, L., Pietrzyk, S., Fortuna, T., Khachatryan, G.** (2019). Relationship between sorption characteristic and selected functional properties of

- chemically modified waxy maize starches. *Journal of Food Processing and Preservation*, 43(7).
- Krongworakul, N., Naivikul, O., Boonsupthip, W., Wang, Y. J.** (2020). Effect of conventional and microwave heating on physical and chemical properties of jasmine brown rice in various forms. *Journal of Food Process Engineering*, 43(10).
- Lafiandra, D., Sestili, F., Sissons, M., Kiszonas, A., Morris, C. F.** (2022). Increasing the versatility of durum wheat through modifications of protein and starch composition and grain hardness. *Foods*, 11(11), 1532.
- Lagerstedt, A., Ahnstrom, M. L., Lundstrom, K.** (2011). Vacuum skin pack of beef - a consumer friendly alternative. *Meat Science*, 88(3), 391-396.
- Lagerstedt, A., Enfalt, L., Johansson, L., Lundstrom, K.** (2008). Effect of freezing on sensory quality, shear force and water loss in beef *M. longissimus dorsi*. *Meat Science*, 80(2), 457-461.
- Lakshminarayan, S. M., Rathinam, V., KrishnaRau, L.** (2006). Effect of maltodextrin and emulsifiers on the viscosity of cake batter and on the quality of cakes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(5), 706-712.
- Lamacchia, C., Di Luccia, A., Baiano, A., Gambacorta, G., la Gatta, B., Pati, S., La Notte, E.** (2007). Changes in pasta proteins induced by drying cycles and their relationship to cooking behaviour. *Journal of Cereal Science*, 46(1), 58-63.
- Ledward, D. A.** (1985). Post-slaughter influences on the formation of metmyoglobin in beef muscles. *Meat Science*, 15(3), 149-171.
- Lee, C. Y., Bourne, M. C., Van Buren, J. P.** (1979). Effect of blanching treatments on the firmness of carrots. *Journal of Food Science*, 44(2), 615-616.
- Lehmann, U., Robin, F.** (2007). Slowly digestible starch - its structure and health implications: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 18(7), 346-355.
- Leon, K., Mery, D., Pedreschi, F., Leon, J.** (2006). Color measurement in L* a* b* units from RGB digital images. *Food Research International*, 39(10), 1084-1091.
- Lepetit, J.** (2008). Collagen contribution to meat toughness: Theoretical aspects. *Meat Science*, 80(4), 960-967.
- Levine, H., Slade, L.** (1988). Water as a plasticizer: Physico-chemical aspects of low-moisture polymeric systems. *Water science reviews*, 3, 79-185.
- Li, C., Wang, D. Y., Dong, H., Xu, W. M., Gao, F., Zhou, G. H., Zhang, M. H.** (2013). Effects of different cooking regimes on the microstructure and tenderness of duck breast muscle. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(8), 1979-1985.
- Li, C., Zhou, G. H., Xu, X. L.** (2010). Dynamical changes of beef intramuscular connective tissue and muscle fiber during heating and their effects on beef shear force. *Food and Bioprocess Technology*, 3(4), 521-527.

- Li, J., Han, W., Xu, J., Xiong, S., Zhao, S.** (2014). Comparison of morphological changes and in vitro starch digestibility of rice cooked by microwave and conductive heating. *Starch - Stärke*, 66(5-6), 549-557.
- Lien, R., Hunt, M. C., Anderson, S., Kropf, D. H., Loughin, T. M., Dikeman, M. E., Velazco, J.** (2002). Effects of endpoint temperature on the internal color of pork loin chops of different quality. *Journal of Food Science*, 67(3), 1007-1010.
- Lin, C.-H., Chang, C.-Y.** (2005). Textural change and antioxidant properties of broccoli under different cooking treatments. *Food Chemistry*, 90(1), 9-15.
- Ling, B., Tang, J., Kong, F., Mitcham, E. J., Wang, S.** (2015). Kinetics of food quality changes during thermal processing: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 8(2), 343-358.
- Listrat, A., Lebret, B., Louveau, I., Astruc, T., Bonnet, M., Lefaucheur, L., Picard, B., Bugeon, J.** (2016). How muscle structure and composition influence meat and flesh quality. *The Scientific World Journal*, 2016, 3182746.
- Listrat, A., Lethias, C., Hocquette, J. F., Renand, G., Menissier, F., Geay, Y., Picard, B.** (2000). Age-related changes and location of types i, iii, xii and xiv collagen during development of skeletal muscles from genetically different animals. *Histochemical Journal*, 32(6), 349-356.
- Listrat, A., Picard, B., Geay, Y.** (1999). Age-related changes and location of type I, III, IV, V and VI collagens during development of four foetal skeletal muscles of double-musced and normal bovine animals. *Tissue & Cell*, 31(1), 17-27.
- Liu, C.-Y., Shepherd, K. W., Rathjen, A.** (1996). Improvement of durum wheat pastamaking and breadmaking qualities. *Cereal Chemistry*, 73, 155-166.
- Liu, H., Qi, J., Hayakawa, K.** (1997). Rheological properties including tensile fracture stress of semolina extrudates influenced by moisture content. *Journal of Food Science*, 62(4), 813-815.
- Liu, J., Bi, J., McClements, D. J., Liu, X., Yi, J., Lyu, J., Zhou, M., Verkerk, R., Dekker, M., Wu, X., Liu, D.** (2020a). Impacts of thermal and non-thermal processing on structure and functionality of pectin in fruit- and vegetable- based products: A review. *Carbohydrate Polymers*, 250, 116890.
- Liu, S. Y., Reimer, M., Ai, Y. F.** (2020b). In vitro digestibility of different types of resistant starches under high-temperature cooking conditions. *Food Hydrocolloids*, 107, 105927.
- Llorach, R., Tomas-Barberan, F. A., Ferreres, F.** (2004). Lettuce and chicory byproducts as a source of antioxidant phenolic extracts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(16), 5109-5116.
- López Osornio, M. M., Hough, G., Salvador, A., Chambers, E., McGraw, S., Fiszman, S.** (2008). Beef's optimum internal cooking temperature as seen by consumers from different countries using survival analysis statistics. *Food Quality and Preference*, 19(1), 12-20.

- Lopez, P., Sanchez, A. C., Vercet, A., Burgos, J.** (1997). Thermal resistance of tomato polygalacturonase and pectinmethylesterase at physiological pH. *Zeitschrift Fur Lebensmittel-Untersuchung Und-Forschung a-Food Research and Technology*, 204(2), 146-150.
- Lostie, M., Peczalski, R., Andrieu, J., Laurent, M.** (2002a). Study of sponge cake batter baking process. II. Modeling and parameter estimation. *Journal of Food Engineering*, 55(4), 349-357.
- Lostie, M., Peczalski, R., Andrieu, J., Laurent, M.** (2002b). Study of sponge cake batter baking process. Part I: Experimental data. *Journal of Food Engineering*, 51(2), 131-137.
- Lucisano, M., Cappa, C., Fongaro, L., Mariotti, M.** (2012). Characterisation of gluten-free pasta through conventional and innovative methods: Evaluation of the cooking behaviour. *Journal of Cereal Science*, 56(3), 667-675.
- Luckett, C. R., Wang, Y. J.** (2012). Effects of β -amylolysis on the resistant starch formation of debranched corn starches. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(18), 4751-4757.
- Lund, D., Lorenz, K.** (1984). Influence of time, temperature, moisture, ingredients, and processing conditions on starch gelatinization. *C R C Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 20, 249-273.
- Lytras, G. N., Geileskey, A., King, R. D., Ledward, D. A.** (1999). Effect of muscle type, salt and ph on cooked meat haemoprotein formation in lamb and beef. *Meat Science*, 52(2), 189-194.
- Lytras, G. N., King, R. D., Ledward, D. A.** (2000). Prediction of the soluble myoglobin content of cooked burgers. *Meat Science*, 55(2), 247-250.
- Machado, M. F., Oliveira, F. A. R., Cunha, L. M.** (1999). Effect of milk fat and total solids concentration on the kinetics of moisture uptake by ready-to-eat breakfast cereal. *International Journal of Food Science and Technology*, 34(1), 47-57.
- Mahasukhonthachat, K., Sopade, P. A., Gidley, M. J.** (2010). Kinetics of starch digestion in sorghum as affected by particle size. *Journal of Food Engineering*, 96(1), 18-28.
- Maillard, L. C.** (1912). Formation of melanoidins in a methodical way. *Comptes Rendus*, 154, 66-68.
- Majzoobi, M., Jalali, A. R., Farahnaky, A.** (2016). Impact of whole oat flour on dough properties and quality of fresh and stored part-baked bread. *Journal of Food Quality*, 39(6), 620-626.
- Majzoobi, M., Ostovan, R., Farahnaky, A.** (2011). Effects of gluten powder on the quality of wheat flour spaghetti cooked in distilled or salted water. *Journal of Texture Studies*, 42(6), 468-477.
- Makris, D. P., Rossiter, J. T.** (2001). Domestic processing of onion bulbs (*Allium cepa*) and asparagus spears (*Asparagus officinalis*): Effect on flavonol content and

- antioxidant status. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(7), 3216-3222.
- Malcolmson, L. J., Matsuo, R. R.** (1993). Effects of cooking water composition on stickiness and cooking loss of spaghetti. *Cereal Chemistry*, 70(3), 272-275.
- Managa, M. G., Remize, F., Garcia, C., Sivakumar, D.** (2019). Effect of moist cooking blanching on colour, phenolic metabolites and glucosinolate content in chinese cabbage (*Brassica rapa L. subsp. chinensis*). *Foods*, 8(9), 399.
- Mancini, R. A.** (2009). Meat color. In Kerry, J. P. and Ledward, D. (Eds.), *Improving the sensory and nutritional quality of fresh meat* (pp. 89-110).
- Mancini, R. A., Hunt, M. C.** (2005). Current research in meat color. *Meat Science*, 71(1), 100-121.
- Mancini, R. A., Kropf, D. H., Hunt, M. C., Johnson, D. E.** (2005). Effects of endpoint temperature, pH, and storage time on cooked internal color reversion of pork *longissimus* chops. *Journal of Muscle Foods*, 16(1), 16-26.
- Manninen, H., Paakki, M., Hopia, A., Franzén, R.** (2015). Measuring the green color of vegetables from digital images using image analysis. *LWT - Food Science and Technology*, 63(2), 1184-1190.
- Manthey, F. A., Schorno, A. L.** (2002). Physical and cooking quality of spaghetti made from whole wheat durum. *Cereal Chemistry*, 79(4), 504-510.
- Marchylo, B. A., Dexter, J. E., Malcolmson, L.** (2004). Improving the texture of pasta. In Kilcast (Ed.), *Texture in food: Volume 2: Solid foods* (Vol. 2, pp. 475-500). Cambridge, UK: Woodhead Publishing Ltd.
- Martens, H., Stabursvik, E., Martens, M.** (1982). Texture and color changes in meat during cooking related to thermal-denaturation of muscle proteins. *Journal of Texture Studies*, 13(3), 291-309.
- Martens, H., Vold, E.** (1976). *DSC studies of muscle protein denaturation*. Paper presented at the 22nd European meeting of meat research workers, Malmö, Sweden.
- Marti, A., Pagani, M. A.** (2013). What can play the role of gluten in gluten free pasta? *Trends in Food Science & Technology*, 31(1), 63-71.
- Martinez-Cervera, S., Sanz, T., Salvador, A., Fiszman, S. M.** (2012). Rheological, textural and sensorial properties of low-sucrose muffins reformulated with sucralose/polydextrose. *LWT-Food Science and Technology*, 45(2), 213-220.
- Martinez, C. S., Ribotta, P. D., Leon, A. E., Anon, M. C.** (2007). Physical, sensory and chemical evaluation of cooked spaghetti. *Journal of Texture Studies*, 38(6), 666-683.
- Martins, S., Jongen, W. M. F., van Boekel, M.** (2000). A review of maillard reaction in food and implications to kinetic modelling. *Trends in Food Science & Technology*, 11(9-10), 364-373.

- Maskan, M.** (2001). Effect of maturation and processing on water uptake characteristics of wheat. *Journal of Food Engineering*, 47(1), 51-57.
- Mastrangelo, A. M., Cattivelli, L.** (2021). What makes bread and durum wheat different? *Trends in Plant Science*, 26(7), 677-684.
- Matos, M. E., Sanz, T., Rosell, C. M.** (2014). Establishing the function of proteins on the rheological and quality properties of rice based gluten free muffins. *Food Hydrocolloids*, 35, 150-158.
- Matsuo, R., Irvine, G.** (1974). Relationship between the grl spaghetti tenderness tester and sensory testing of cooked spaghetti. *Canadian Institute of Food Science Technology Journal*, 7(2), 155-156.
- Matsuo, R. R., Bradley, J. W., Irvine, G. N.** (1972). Effect of protein content on the cooking quality of spaghetti. *Cereal Chemists*, 49, 707-711.
- Matsuo, R. R., Irvine, G. N.** (1969). Spaghetti tenderness testing apparatus. *Cereal Chemistry*, 46(1), 1-6.
- Matsuo, R. R., Irvine, G. N.** (1970). Effect of gluten on cooking quality of spaghetti. *Cereal Chemistry*, 47(2), 173-180.
- Matsuo, R. R., Irvine, G. N.** (1971). Note on an improved apparatus for testing spaghetti tenderness. *Cereal Chemistry*, 48(5), 554-558.
- Matsuo, R. R., Malcolmson, L. J., Edwards, N. M., Dexter, J. E.** (1992). A colorimetric method for estimating spaghetti cooking losses. *Cereal Chemistry*, 69(1), 27-29.
- McCleary, B. V., McNally, M., Rossiter, P.** (2002). Measurement of resistant starch by enzymatic digestion in starch and selected plant materials: Collaborative study. *Journal of AOAC International*, 85(5), 1103-1111.
- McCurdy, S. M., Hillers, V., Cann, S. E.** (2005). Consumer reaction and interest in using food thermometers when cooking small or thin meat items. *Food protection trends*, 25, 826-831.
- McGee, H.** (2004). *On food and cooking: The science and lore of the kitchen*: Scribner.
- McKenna, D. R., Mies, P. D., Baird, B. E., Pfeiffer, K. D., Ellebracht, J. W., Savell, J. W.** (2005). Biochemical and physical factors affecting discoloration characteristics of 19 bovine muscles. *Meat Science*, 70(4), 665-682.
- Menger, A.** (1979). *Crucial points of view concerning the execution of pasta cooking tests and their evaluation*. Paper presented at the ICC international symposium: Matières Premières et Pâtes Alimentaires, Instituto Nazionale della Nutrizione: Rome, Italy.
- Mercier, S., Marcos, B., Moresoli, C., Mondor, M., Villeneuve, S.** (2014). Modeling of internal moisture transport during durum wheat pasta drying. *Journal of Food Engineering*, 124, 19-27.
- Mercier, S., Moresoli, C., Mondor, M., Villeneuve, S., Marcos, B.** (2016). A meta-analysis of enriched pasta: What are the effects of enrichment and process

- specifications on the quality attributes of pasta? *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(4), 685-704.
- Miglio, C., Chiavaro, E., Visconti, A., Fogliano, V., Pellegrini, N.** (2008). Effects of different cooking methods on nutritional and physicochemical characteristics of selected vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(1), 139-147.
- Miles, M. J., Morris, V. J., Orford, P. D., Ring, S. G.** (1985). The roles of amylose and amylopectin in the gelation and retrogradation of starch. *Carbohydrate Research*, 135(2), 271-281.
- Miller, M. F., Carr, M. A., Ramsey, C. B., Crockett, K. L., Hoover, L. C.** (2001). Consumer thresholds for establishing the value of beef tenderness. *Journal of Animal Science*, 79(12), 3062-3068.
- Mkandawire, N. L., Kaufman, R. C., Bean, S. R., Weller, C. L., Jackson, D. S., Rose, D. J.** (2013). Effects of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) tannins on alpha-amylase activity and in vitro digestibility of starch in raw and processed flours. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61(18), 4448-4454.
- Moledina, K. H., Haydar, M., Ooraikul, B., Hadziyev, D.** (1981). Pectin changes in the pre-cooking step of dehydrated mashed potato production. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 32(11), 1091-1102.
- Monalisa, K., Bhuiyan, J. A., Islam, M. Z., Sayem, A. S. M.** (2020). Boiling-induced changes on physicochemical, bioactive compounds, color, and texture properties of pumpkin (*cucurbita maxima*). *Food Science and Technology International*, 26(4), 333-343.
- Mondal, A., Datta, A. K.** (2008). Bread baking - a review. *Journal of Food Engineering*, 86(4), 465-474.
- Morreale, F., Boukid, F., Carini, E., Federici, E., Vittadini, E., Pellegrini, N.** (2019). An overview of the Italian market for 2015: Cooking quality and nutritional value of gluten-free pasta. *International Journal of Food Science and Technology*, 54(3), 780-786.
- Morris, V. J.** (1990). Starch gelation and retrogradation. *Trends in Food Science & Technology*, 1, 2-6.
- Morrison, W. R., Tester, R. F., Snape, C. E., Law, R., Gidley, M. J.** (1993). Swelling and gelatinization of cereal starches. Iv. Some effects of lipid-complexed amylose and free amylose in waxy. *Cereal Chemistry*, 70(4), 385-391.
- Moscetti, R., Saeys, W., Keresztes, J. C., Goodarzi, M., Cecchini, M., Danilo, M., Massantini, R.** (2015). Hazelnut quality sorting using high dynamic range short-wave infrared hyperspectral imaging. *Food and Bioprocess Technology*, 8(7), 1593-1604.
- Mousavinejad, G., Rezaei, K., Khodaiyan, F.** (2015). Reducing acrylamide in fried potato pancake using baker's yeast, lactobacilli and microalgae. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 7(5), 779-787.

- Murador, D., Braga, A. R., Da Cunha, D., De Rosso, V.** (2018). Alterations in phenolic compound levels and antioxidant activity in response to cooking technique effects: A meta-analytic investigation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(2), 169-177.
- Murata, M.** (2021). Browning and pigmentation in food through the Maillard reaction. *Glycoconjugate Journal*, 38(3), 283-292.
- Murray, J. C., Kiszonas, A. M., Morris, C. F.** (2017). Pasta production: Complexity in defining processing conditions for reference trials and quality assessment methods. *Cereal Chemistry*, 94(5), 791-797.
- Myhrvold, N., Young, C., Bilet, M.** (2011). *Modernist cuisine*: Taschen.
- Najafabadi, L. I., Le-Bail, A., Hamdami, N., Monteau, J. Y., Keramat, J.** (2014). Impact of baking conditions and storage temperature on staling of fully and part-baked sangak bread. *Journal of Cereal Science*, 60(1), 151-156.
- Nambi, V. E., Gupta, R. K., Kumar, S., Sharma, P. C.** (2016). Degradation kinetics of bioactive components, antioxidant activity, colour and textural properties of selected vegetables during blanching. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 53(7), 3073-3082.
- Namiki, M.** (1990). Antioxidants antimutagens in food. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 29(4), 273-300.
- NCBA.** (1998). *Beef steak color guide: Degrees of doneness*. Paper presented at the Centennial, CO: National Cattlemen's Beef Association, Research and Knowledge Management.
- Nelson, H., Deyo, S., Granzier-Nakajima, S., Puente, P., Tully, K., Webb, J.** (2020). A mathematical model for meat cooking. *European Physical Journal Plus*, 135(3).
- Nesvadba, P.** (2014). Thermal properties of unfrozen foods. In M.A. Rao, S. S. H. R., Ashim K. Datta (Ed.), *Engineering properties of foods* (Vol. 4, pp. 223-245): Taylor and Francis Group.
- Ngapo, T. M., Berge, P., Culioli, J., De Smet, S.** (2002). Perimysial collagen crosslinking in belgian blue double-muscled cattle. *Food Chemistry*, 77(1), 15-26.
- Nhouchi, Z., Botosoa, E. P., Karoui, R.** (2018). Critical assessment of formulation, processing and storage conditions on the quality of alveolar baked products determined by different analytical techniques: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 81, 159-171.
- Nicoli, M. C., Anese, M., Parpinel, M.** (1999). Influence of processing on the antioxidant properties of fruit and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 10(3), 94-100.
- Nikmaram, P., Yarmand, M. S., Emamjomeh, Z., Darehabi, H. K.** (2011). The effect of cooking methods on textural and microstructure properties of veal muscle (*longissimus dorsi*). *Global Veterinaria*, 6(2), 201-207.

- Nilusha, R. A. T., Jayasinghe, J., Perera, O., Perera, P. I. P.** (2019). Development of pasta products with nonconventional ingredients and their effect on selected quality characteristics: A brief overview. *International Journal of Food Science*, 2019, 1-10.
- Nishimura, T.** (2015). Role of extracellular matrix in development of skeletal muscle and postmortem aging of meat. *Meat Science*, 109, 48-55.
- Nursten, H.** (2005). *The Maillard reaction: Chemistry, biochemistry and implications*. London, UK: Royal Society of Chemistry.
- O'Keeffe, M., Hood, D. E.** (1982). Biochemical factors influencing metmyoglobin formation on beef from muscles of differing color stability. *Meat Science*, 7(3), 209-228.
- Obuz, E., Powell, T. H., Dikeman, M. E.** (2002). Simulation of cooking cylindrical beef roasts. *LWT*, 35(8), 637-644.
- Offer, G.** (1984). *Progress in the biochemistry, physiology and structure of meat*. Paper presented at the Proceedings of the 30th European meeting of meat research workers, Bristol, UK.
- Offer, G., Knight, P., Jeacocke, R., Almond, R., Cousins, T., Elsey, J., Parsons, N., Sharp, A., Starr, R., Purslow, P.** (1989). The structural basis of the water-holding, appearance and toughness of meat and meat products. *Food Microstructure*, 8(1), 151-170.
- Oh, N. H., Seib, P. A., Deyoe, C. W., Ward, A. B.** (1983). Noodles. I. Measuring the textural characteristics of cooked noodles. *Cereal Chemistry*, 60(6), 433-438.
- Ohmura, M., Matsumiya, K., Tatsuro, M., Fujita, A., Hayashi, Y., Matsumura, Y.** (2021). Change in surface structure and inner microstructure of durum wheat pasta during the boiling process. *Lwt-Food Science and Technology*, 149.
- Oillic, S., Lemoine, E., Gros, J. B., Kondjoyan, A.** (2011). Kinetic analysis of cooking losses from beef and other animal muscles heated in a water bath - effect of sample dimensions and prior freezing and ageing. *Meat Science*, 88(3), 338-346.
- Okur, I., Sezer, P., Oztop, M. H., Alpas, H.** (2021). Recent advances in gelatinisation and retrogradation of starch by high hydrostatic pressure. *International Journal of Food Science and Technology*.
- Oroszvari, B. K., Bayod, E., Sjöholm, I., Tornberg, E.** (2005). The mechanisms controlling heat and mass transfer on frying of beefburgers. Part 2: The influence of the pan temperature and patty diameter. *Journal of Food Engineering*, 71(1), 18-27.
- Oswell, N. J., Gilstrap, O. P., Pegg, R. B.** (2021). Variation in the terminology and methodologies applied to the analysis of water holding capacity in meat research. *Meat Science*, 178.
- Pakula, C., Stamminger, R.** (2012). Measuring changes in internal meat colour, colour lightness and colour opacity as predictors of cooking time. *Meat Science*, 90(3), 721-727.

- Palazoğlu, T. K., Coşkun, Y., Tuta, S., Mogol, B. A., Gökmen, V.** (2015). Effect of vacuum-combined baking of cookies on acrylamide content, texture and color. *European Food Research and Technology*, 240(1), 243-249.
- Palka, K., Daun, H.** (1999). Changes in texture, cooking losses, and myofibrillar structure of bovine *M. semitendinosus* during heating. *Meat Science*, 51(3), 237-243.
- Pan, Z., Singh, R. P.** (2002). Heating surface temperature and contact-heat transfer coefficient of a clam-shell grill. *LWT - Food Science and Technology*, 35(4), 348-354.
- Pan, Z., Singh, R. P., Rumsey, T. R.** (2000). Predictive modeling of contact-heating process for cooking a hamburger patty. *Journal of Food Engineering*, 46(1), 9-19.
- Pathare, P. B., Roskilly, A. P.** (2016). Quality and energy evaluation in meat cooking. *Food Engineering Reviews*, 8(4), 435-447.
- Pedraza-Chaverri, J., Medina-Campos, O. N., Avila-Lombardo, R., Zuniga-Bustos, A. B., Orozco-Ibarra, M.** (2006). Reactive oxygen species scavenging capacity of different cooked garlic preparations. *Life Sciences*, 78(7), 761-770.
- Pedreschi, F., Kaack, K., Granby, K.** (2004). Reduction of acrylamide formation in potato slices during frying. *LWT - Food Science and Technology*, 37(6), 679-685.
- Pedreschi, F., Kaack, K., Granby, K.** (2006a). Acrylamide content and color development in fried potato strips. *Food Research International*, 39(1), 40-46.
- Pedreschi, F., Leon, J., Mery, D., Moyano, P.** (2006b). Development of a computer vision system to measure the color of potato chips. *Food Research International*, 39(10), 1092-1098.
- Peleg, M.** (1988). An empirical model for the description of moisture sorption curves. *Journal of Food Science*, 53(4), 1216-1217.
- Pellegrini, N., Chiavaro, E., Gardana, C., Mazzeo, T., Contino, D., Gallo, M., Riso, P., Fogliano, V., Porrini, M.** (2010). Effect of different cooking methods on color, phytochemical concentration, and antioxidant capacity of raw and frozen brassica vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(7), 4310-4321.
- Pematilleke, N., Kaur, M., Adhikari, B., Torley, P. J.** (2021). Relationship between instrumental and sensory texture profile of beef semitendinosus muscles with different textures. *Journal of Texture Studies*, 53(2), 232-241.
- Petitot, M., Abecassis, J., Micard, V.** (2009a). Structuring of pasta components during processing: Impact on starch and protein digestibility and allergenicity. *Trends in Food Science & Technology*, 20(11-12), 521-532.
- Petitot, M., Brossard, C., Barron, C., Larre, C., Morel, M. H., Micard, V.** (2009b). Modification of pasta structure induced by high drying temperatures. Effects on the in vitro digestibility of protein and starch fractions and the potential allergenicity of protein hydrolysates. *Food Chemistry*, 116(2), 401-412.

- Petkowicz, C. L. O., Williams, P. A.** (2020). Pectins from food waste: Characterization and functional properties of a pectin extracted from broccoli stalk. *Food Hydrocolloids*, 107, 105930.
- Piazza, L., Riva, M., Schiraldi, A.** (1994). Indagini calorimetriche sulla cinetica di gelatinizzazione dell'amido durante la cottura della pasta e del riso. *Tecnica Molitoria*, 45, 638-646.
- Podsdek, A.** (2007). Natural antioxidants and antioxidant capacity of brassica vegetables: A review. *LWT-Food Science and Technology*, 40(1), 1-11.
- Podsdek, A., Sosnowska, D., Redzynia, M., Koziolkiewicz, M.** (2008). Effect of domestic cooking on the red cabbage hydrophilic antioxidants. *International Journal of Food Science and Technology*, 43(10), 1770-1777.
- Prasad, K., Laxdal, V. A., Yu, M., Raney, B. L.** (1996). Evaluation of hydroxyl radical-scavenging property of garlic. *Molecular and Cellular Biochemistry*, 154(1), 55-63.
- Purlis, E.** (2010). Browning development in bakery products - a review. *Journal of Food Engineering*, 99(3), 239-249.
- Purlis, E., Cevoli, C., Fabbri, A.** (2021). Modelling volume change and deformation in food products/processes: An overview. *Foods*, 10(4).
- Purlis, E., Salvadori, V. O.** (2007). Bread browning kinetics during baking. *Journal of Food Engineering*, 80(4), 1107-1115.
- Purlis, E., Salvadori, V. O.** (2009). Modelling the browning of bread during baking. *Food Research International*, 42(7), 865-870.
- Purslow, P. P.** (2005). Intramuscular connective tissue and its role in meat quality. *Meat Science*, 70(3), 435-447.
- Purslow, P. P., Oiseth, S., Hughes, J., Warner, R. D.** (2016). The structural basis of cooking loss in beef: Variations with temperature and ageing. *Food Research International*, 89, 739-748.
- Purslow, P. P., Warner, R. D., Clarke, F. M., Hughes, J. M.** (2020). Variations in meat colour due to factors other than myoglobin chemistry; a synthesis of recent findings (invited review). *Meat Science*, 159:107941.
- Putranto, A., Chen, X. D., Zhou, W.** (2015). Bread baking and its color kinetics modeled by the spatial reaction engineering approach (S-REA). *Food Research International*, 71, 58-67.
- Putseys, J. A., Derde, L. J., Lamberts, L., Ostman, E., Bjorck, I. M., Delcour, J. A.** (2010a). Functionality of short chain amylose-lipid complexes in starch-water systems and their impact on in vitro starch degradation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(3), 1939-1945.
- Putseys, J. A., Lamberts, L., Delcour, J. A.** (2010b). Amylose-inclusion complexes: Formation, identity and physico-chemical properties. *Journal of Cereal Science*, 51(3), 238-247.

- Puuponen-Pimia, R., Hakkinen, S. T., Aarni, M., Suortti, T., Lampi, A. M., Eurola, M., Piironen, V., Nuutila, A. M., Oksman-Caldentey, K. M.** (2003). Blanching and long-term freezing affect various bioactive compounds of vegetables in different ways. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(14), 1389-1402.
- Pycarelle, S. C., Winnen, K. L. J., Bosmans, G. M., Van Haesendonck, I., Pareyt, B., Brijs, K., Delcour, J. A.** (2019). Wheat (*Triticum aestivum* L.) flour free lipid fractions negatively impact the quality of sponge cake. *Food Chemistry*, 271, 401-409.
- Pyle, D. L.** (2005). Crumpet structures: Experimental and modelling studies. *Food and Bioproducts Processing*, 83(2), 81-88.
- Quevedo, R., Pedreschi, F., Bastias, J. M., Díaz, O.** (2016). Correlation of the fractal enzymatic browning rate with the temperature in mushroom, pear and apple slices. *LWT - Food Science and Technology*, 65, 406-413.
- Quevedo, R., Rojas, R., Pedreschi, F., Bastias, J. M., Siche, R., Uquiche, E., Silva, D., Diaz, O.** (2018). Quantification of the browning kinetic on pita bread using fractal method. *Food and Bioprocess Technology*, 11(1), 201-208.
- Rabeler, F., Feyissa, A. H.** (2018a). Kinetic modeling of texture and color changes during thermal treatment of chicken breast meat. *Food and Bioprocess Technology*, 11(8), 1495-1504.
- Rabeler, F., Feyissa, A. H.** (2018b). Modelling the transport phenomena and texture changes of chicken breast meat during the roasting in a convective oven. *Journal of Food Engineering*, 237, 60-68.
- Rahelić, S., Puač, S., Gawwad, A. H.** (1985). Structure of beef *Longissimus dorsi* muscle frozen at various temperatures: Part 1—histological changes in muscle frozen at -10, -22, -33, -78, -115 and -196 °C. *Meat Science*, 14(2), 63-72.
- Ramirez-Jimenez, A., Guerra-Hernandez, E., Garcia-Villanova, B.** (2000). Browning indicators in bread. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(9), 4176-4181.
- Ramos dos Reis, L. C., de Oliveira, V. R., Hagen, M. E. K., Jablonski, A., Flores, S. H., Rios, A. D.** (2015). Carotenoids, flavonoids, chlorophylls, phenolic compounds and antioxidant activity in fresh and cooked broccoli (*Brassica oleracea* var. Avenger) and cauliflower (*Brassica oleracea* var. Alphina F1). *LWT-Food Science and Technology*, 63(1), 177-183.
- Rao, G. V., Rao, P. H.** (1993). Methods for determining rheological characteristics of doughs: A critical evaluation. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 30(2), 77-87.
- Rao, M. A., Rizvi, S. S., Datta, A. K., Ahmed, J.** (2005). *Engineering properties of foods* (third ed ed. Vol. 144): Taylor & Francis, Boca Raton
- Reddy, I. M., Carpenter, C. E.** (1991). Determination of metmyoglobin reductase-activity in bovine skeletal-muscles. *Journal of Food Science*, 56(5), 1161-1164.

- Reed, M. O., Ai, Y., Leutcher, J. L., Jane, J.-I.** (2013). Effects of cooking methods and starch structures on starch hydrolysis rates of rice. *Journal of Food Science*, 78(7), H1076-H1081.
- Rennerre, M., Labas, R.** (1987). Biochemical factors influencing metmyoglobin formation in beef muscles. *Meat Science*, 19(2), 151-165.
- Resmini, P., Pagani, M. A.** (1983). Ultrastructure studies of pasta: A review. *Food Microstructure*, 2(1), 1-12.
- Riva, M., Fessas, D., Schiraldi, A.** (2000). Starch retrogradation in cooked pasta and rice. *Cereal Chemistry*, 77(4), 433-438.
- Rizzi, G. P.** (1997). Chemical structure of colored maillard reaction products. *Food Reviews International*, 13(1), 1-28.
- Roca, M., Chen, K., Pérez-Gálvez, A.** (2016). Chlorophylls. In Carle, R. and Schweiggert, R. M. (Eds.), *Handbook on natural pigments in food and beverages* (pp. 125-158): Woodhead Publishing.
- Rocca-Polimeni, R., Vilet, N. Z., Roux, S., Bailleul, J. L., Broyart, B.** (2019). Continuous measurement of contact heat flux during minced meat grilling. *Journal of Food Engineering*, 242, 163-171.
- Rocha-Guzman, N. E., Gonzalez-Laredo, R. F., Ibarra-Perez, F. J., Nava-Berumen, C. A., Gallegos-Infante, J. A.** (2007). Effect of pressure cooking on the antioxidant activity of extracts from three common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *Food Chemistry*, 100(1), 31-35.
- Rojas-Molina, I., Mendoza-Avila, M., Cornejo-Villegas, M. D., Del Real-Lopez, A., Rivera-Munoz, E., Rodriguez-Garcia, M., Gutierrez-Cortez, E.** (2020). Physicochemical properties and resistant starch content of corn tortilla flours refrigerated at different storage times. *Foods*, 9(4): 469.
- Ronda, F., Oliete, B., Gómez, M., Caballero, P. A., Pando, V.** (2011). Rheological study of layer cake batters made with soybean protein isolate and different starch sources. *Journal of Food Engineering*, 102(3), 272-277.
- Ross, J. A., Kasum, C. M.** (2002). Dietary flavonoids: Bioavailability, metabolic effects, and safety. *Annual Review of Nutrition*, 22, 19-34.
- Rowe, R. W. D.** (1989). Electron microscopy of bovine muscles: II – The effects of heat denaturation on post rigor sarcolemma and endomysium. *Meat Science*, 26(4), 281-294.
- Roy, M. K., Takenaka, M., Isobe, S., Tsushida, T.** (2007). Antioxidant potential, anti-proliferative activities, and phenolic content in water-soluble fractions of some commonly consumed vegetables: Effects of thermal treatment. *Food Chemistry*, 103(1), 106-114.
- Rudra, S. G., Sarkar, B. C., Shivhare, U. S.** (2008). Thermal degradation kinetics of chlorophyll in pureed coriander leaves. *Food and Bioprocess Technology*, 1(1), 91-99.

- Ruiz Díaz, G., Martínez-Monzó, J., Fito, P., Chiralt, A.** (2003). Modelling of dehydration-rehydration of orange slices in combined microwave/air drying. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 4(2), 203-209.
- Sablani, S. S., Marcotte, M., Baik, O. D., Castaigne, F.** (1998). Modeling of simultaneous heat and water transport in the baking process. *Food Science and Technology-Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 31(3), 201-209.
- Sagis, L. M. C., de Groot-Mostert, A. E. A., Prins, A., van der Linden, E.** (2001). Effect of copper ions on the drainage stability of foams prepared from egg white. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 180(1-2), 163-172.
- Sagum, R., Arcot, J.** (2000). Effect of domestic processing methods on the starch, non-starch polysaccharides and in vitro starch and protein digestibility of three varieties of rice with varying levels of amylose. *Food Chemistry*, 70(1), 107-111.
- Sahagun, M., Bravo-Nunez, A., Bascones, G., Gomez, M.** (2018). Influence of protein source on the characteristics of gluten-free layer cakes. *LWT-Food Science and Technology*, 94, 50-56.
- Sahi, S. S., Alava, J. M.** (2003). Functionality of emulsifiers in sponge cake production. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83(14), 1419-1429.
- Sahin, S.** (2008). Cake batter rheology. In Sumnu, S. G. and Sahin, S. (Eds.), *Food engineering aspects of baking sweet goods* (pp. 99-119). Florida, USA CSR Press, Boca Raton.
- Sanz-Serrano, F., Sagues, C., Feyissa, A. H., Adler-Nissen, J., Llorente, S.** (2017). Modeling of pancake frying with non-uniform heating source applied to domestic cookers. *Journal of Food Engineering*, 195, 114-127.
- Sargolzaei, J., Abarzani, M., Aminzadeh, R.** (2011). Modeling and simulation of hamburger cooking process using finite difference and CFD methods. *International Journal Of Industrial Chemistry*, 2, 52-62.
- Sarvan, I., Verkerk, R., Dekker, M.** (2012). Modelling the fate of glucosinolates during thermal processing of brassica vegetables. *LWT-Food Science and Technology*, 49(2), 178-183.
- Sarvan, I., Verkerk, R., van Boekel, M., Dekker, M.** (2014). Comparison of the degradation and leaching kinetics of glucosinolates during processing of four Brassicaceae (broccoli, red cabbage, white cabbage, Brussels sprouts). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 25, 58-66.
- Sato, Y.** (2019). Rheological properties of toasted bread using a modified american association of cereal chemists method to determine compressive force values. *Cereal Chemistry*, 96(6), 1060-1067.
- Savita, S., Arshwinder, K., Gurkirat, K., Vikas, N.** (2013). Influence of different protein sources on cooking and sensory quality of pasta. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 3(2), 1757-1763.

- Schirmer, M., Jekle, M., Becker, T. (2015). Starch gelatinization and its complexity for analysis. *Starch-Starke*, 67(1-2), 30-41.
- Seyfert, M., Mancini, R. A., Hunt, M. C., Tang, J. L., Faustman, C., Garcia, M. (2006). Color stability, reducing activity, and cytochrome cOxidase activity of five bovine muscles. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(23), 8919-8925.
- Sgrulletta, D., Scalfati, G., De Stefanis, E., Conciatori, A. (2005). Dietary fibre components of high-fibre commercial products. Effect of cooking process. *Italian Journal of Food Science*, 17(3), 285-294.
- Shamsudin, R., Ariffin, S. H., Abdullah, W., Azmi, N. S., Halim, A. A. A. (2021). Modelling the kinetics of color and texture changes of dabai (*Canarium odontophyllum Miq.*) during blanching. *Agronomy-Basel*, 11(11).
- Shanks, B. C., Wulf, D. M., Maddock, R. J. (2002). Technical note: The effect of freezing on Warner-Bratzler shear force values of beef longissimus steaks across several postmortem aging periods. *Journal of Animal Science*, 80(8), 2122-2125.
- Sharma, M., Usmani, Z., Gupta, V. K., Bhat, R. (2021). Valorization of fruits and vegetable wastes and by-products to produce natural pigments. *Critical Reviews in Biotechnology*, 41(4), 535-563.
- Sharom, M., Willemot, C., Thompson, J. E. (1994). Chilling injury induces lipid phase-changes in membranes of tomato fruit. *Plant Physiology*, 105(1), 305-308.
- Shetty, R. M., Lineback, D. R., Seib, P. A. (1974). Determining degree of starch gelatinization. *Cereal Chemistry*, 51(3), 364-375.
- Shibanuma, K., Takeda, Y., Hizukuri, S., Shibata, S. (1994). Molecular structures of some wheat starches. *Carbohydrate Polymers*, 25(2), 111-116.
- Shibukawa, S., Sugiyama, K., Yano, T. (1989). Effects of heat transfer by radiation and convection on browning of cookies at baking. *Journal of Food Science*, 54(3), 621-624.
- Sifre, L., Berge, P., Engel, E., Martin, J. F., Bonny, J. M., Listrat, A., Taylor, R., Culioli, J. (2005). Influence of the spatial organization of the perimysium on beef tenderness. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(21), 8390-8399.
- Sila, D. N., Doungra, E., Smout, C., Van Loey, A., Hendrickx, M. (2006). Pectin fraction interconversions: Insight into understanding texture evolution of thermally processed carrots. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(22), 8471-8479.
- Sila, D. N., Duvetter, T., De Roeck, A., Verlent, I., Smout, C., Moates, G. K., Hills, B. P., Waldron, K. K., Hendrickx, M., Van Loey, A. (2008). Texture changes of processed fruits and vegetables: Potential use of high-pressure processing. *Trends in Food Science & Technology*, 19(6), 309-319.
- Sila, D. N., Smout, C., Vu, S. T., Van Loey, A., Hendrickx, M. (2005). Influence of pretreatment conditions on the texture and cell wall components of carrots during thermal processing. *Journal of Food Science*, 70(2), E85-E91.

- Sila, D. N., Van Buggenhout, S., Duvetter, T., Fraeye, I., De Roeck, A., Van Loey, A., Hendrickx, M.** (2009). Pectins in processed fruit and vegetables: Part II - Structure-function relationships. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 8(2), 86-104.
- Silva, T. H. L., Monteiro, R. L., Salvador, A. A., Laurindo, J. B., Carciofi, B. A. M.** (2022). Kinetics of bread physical properties in baking depending on actual finely controlled temperature. *Food Control*, 137.
- Simões de Borba, V., Silveira, C. O., Alves, J. B., Grupelli, V. M., Badiale-Furlong, E.** (2021). Experimental design applied in the semolina pasta cooking to increase the resistant starch formation. *LWT*, 138, 110708.
- Singh, J., Dartois, A., Kaur, L.** (2010). Starch digestibility in food matrix: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 21(4), 168-180.
- Singh, R., Anderson, B.** (2004). *The major types of food spoilage: An overview*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing.
- Singleton, V. L., Orthofer, R., Lamuela-Raventos, R. M.** (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. In Packer, L. (Ed.), *Oxidants and antioxidants, pt a* (Vol. 299, pp. 152-178).
- Sinha, A., Bhargav, A.** (2020). Effect of state transition, drying kinetics and moisture content on young's modulus variation during thermal drying of hygroscopic food materials. *Journal of Food Engineering*, 279: 109957.
- Sissons, M.** (2008). Role of durum wheat composition on the quality of pasta and bread. *Foods*, 2, 75-90.
- Sissons, M., Ames, N., Egan, N., Rhymer, C.** (2008a). A comparison of two instrumental techniques used to discriminate the cooking quality of spaghetti. *International Journal of Food Science and Technology*, 43(7), 1323-1329.
- Sissons, M., Batey, I.** (2003). Protein and starch properties of some tetraploid wheats. *Cereal Chemistry*, 80(4), 468-475.
- Sissons, M., Schlichting, L. M., Egan, N., Aarts, W. A., Harden, S., Marchylo, B. A.** (2008b). A standardized method for the instrumental determination of cooked spaghetti firmness. *Cereal Chemistry*, 85(3), 440-444.
- Smith, T., Tschoegl, N.** (1970). Rheological properties of wheat flour doughs. III. Dynamic shear modulus and its dependence on amplitude, frequency, and dough composition. *Rheologica Acta*, 9(3), 339-344.
- Soh, H. N., Sissons, M. J., Turner, M. A.** (2006). Effect of starch granule size distribution and elevated amylose content on durum dough rheology and spaghetti cooking quality. *Cereal Chemistry*, 83(5), 513-519.
- Sosulski, F.** (1962). The centrifuge method for determining flour absorption in hard red spring wheats. *Cereal Chem*, 39, 344-350.

- Soyer, A., Ertas, A. H., Uzumcuoglu, U.** (2005). Effect of processing conditions on the quality of naturally fermented Turkish sausages (sucuks). *Meat Science*, 69(1), 135-141.
- Sozer, N., Dalgic, A. C., Kaya, A.** (2007). Thermal, textural and cooking properties of spaghetti enriched with resistant starch. *Journal of Food Engineering*, 81(2), 476-484.
- Sreeramulu, D., Reddy, C. V. K., Chauhan, A., Balakrishna, N., Raghunath, M.** (2013). Natural antioxidant activity of commonly consumed plant foods in India: Effect of domestic processing. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2013.
- Stabursvik, E., Martens, H.** (1980). Thermal denaturation of proteins in post rigor muscle tissue as studied by differential scanning calorimetry. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 31(10), 1034-1042.
- Steet, J. A., Tong, C. H.** (1996). Degradation kinetics of green color and chlorophylls in peas by colorimetry and HPLC. *Journal of Food Science*, 61(5), 924-927.
- Steffe, J. F.** (1996). *Rheological methods in food process engineering*. USA: Freeman press.
- Stella, S., Bernardi, C., Tirloni, E.** (2018). Influence of skin packaging on raw beef quality: A review. *Journal of Food Quality*.
- Stewart, A. J., Bozonnet, S., Mullen, W., Jenkins, G. I., Lean, M. E. J., Crozier, A.** (2000). Occurrence of flavonols in tomatoes and tomato-based products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(7), 2663-2669.
- Stolle-Smits, T., Beekhuizen, J. G., Recourt, K., Voragen, A. G. J., van Dijk, C.** (2000). Preheating effects on the textural strength of canned green beans. 1. Cell wall chemistry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(11), 5269-5277.
- Sultana, B., Anwar, F., Iqbal, S.** (2008). Effect of different cooking methods on the antioxidant activity of some vegetables from Pakistan. *International Journal of Food Science & Technology*, 43(3), 560-567.
- Suman, S. P., Faustman, C., Lee, S., Tang, J., Sepe, H. A., Vasudevan, P., Annamalai, T., Manojkumar, M., Marek, P., DeCesare, M., Venkitanarayanan, K. S.** (2004). Effect of muscle source on premature browning in ground beef. *Meat Science*, 68(3), 457-461.
- Suman, S. P., Hunt, M. C., Nair, M. N., Rentfrow, G.** (2014). Improving beef color stability: Practical strategies and underlying mechanisms. *Meat Science*, 98(3), 490-504.
- Suman, S. P., Joseph, P.** (2013). Myoglobin chemistry and meat color. In Doyle, M. P. and Klaenhammer, T. R. (Eds.), *Annual review of food science and technology*, vol 4 (Vol. 4, pp. 79-99).
- Suman, S. P., Nair, M. N.** (2017). Current developments in fundamental and applied aspects of meat color. In Purslow, P. P. (Ed.), *New aspects of meat quality: From genes to ethics* (pp. 111-127).

- Suman, S. P., Nair, M. N., Joseph, P., Hunt, M. C.** (2016). Factors influencing internal color of cooked meats. *Meat Science*, 120, 133-144.
- Sung, W.-C., Stone, M.** (2003). Characterization of various wheat starch in pasta development. *Journal of marine science technology*, 11(2), 61-69.
- Surasani, V. K. R., Singh, A., Gupta, A., Sharma, S.** (2019). Functionality and cooking characteristics of pasta supplemented with protein isolate from pangas processing waste. *LWT-Food Science and Technology*, 111, 443-448.
- Swatland, H. J.** (2002a). Optical dispersion through muscle fibers isolated from pork. *Food Research International*, 35(6), 559-564.
- Swatland, H. J.** (2002b). Relationship between pork muscle fiber diameter and optical transmittance measured by scanning microphotometry. *Canadian Journal of Animal Science*, 82(3), 321-325.
- Swatland, H. J.** (2004). Progress in understanding the paleness of meat with a low pH: Keynote address. *South African Journal of Animal Science*, 34, 1-7.
- Swatland, H. J.** (2012). *Optical properties of meat*. Paper presented at the Proceedings of the 65th Reciprocal Meat Conference, American Meat Science Association, Champaign, IL, USA
- Swatland, H. J., Irving, T. C., Millman, B. M.** (1989). Fluid distribution in pork, measured by X-ray-diffraction, interference microscopy and centrifugation compared to paleness measured by fiber optics. *Journal of Animal Science*, 67(6), 1465-1470.
- Tamura, M., Kumagai, C., Kaur, L., Ogawa, Y., Singh, J.** (2021). Cooking of short, medium and long-grain rice in limited and excess water: Effects on microstructural characteristics and gastro-small intestinal starch digestion in vitro. *LWT-Food Science and Technology*, 146.
- Teng, S. S., Chen, B. H.** (1999). Formation of pyrochlorophylls and their derivatives in spinach leaves during heating. *Food Chemistry*, 65(3), 367-373.
- Terefe, N., Verseeg, C.** (2011). Texture and microstructure of fruits and vegetables. Chapter 4 (part I) In *Practical food and research* (pp. 89-115). UK: Nova Science Publishers.
- Terzic, S., Atlagic, J., Maksimovic, I., Zeremski, T., Zoric, M., Miklic, V., Balalic, I.** (2012). Genetic variability for concentrations of essential elements in tubers and leaves of jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus L.*). *Scientia Horticulturae*, 136, 135-144.
- Tester, R. F., Sommerville, M. D.** (2001). Swelling and enzymatic hydrolysis of starch in low water systems. *Journal of Cereal Science*, 33(2), 193-203.
- Therdthai, N., Zhou, W., Adamczak, T.** (2002). Optimisation of the temperature profile in bread baking. *Journal of Food Engineering*, 55(1), 41-48.

- Therdthai, N., Zhou, W. B.** (2003). Recent advances in the studies of bread baking process and their impacts on the bread baking technology. *Food Science and Technology Research*, 9(3), 219-226.
- Thussu, S., Datta, A.** (2011). Fundamentals-based quality prediction: Texture development during drying and related processes. In Saravacos, G., Taoukis, P., Krokida, M., Karathanos, V., Lazarides, H., Stoforos, N., Tzia, C., and Yanniotis, S. (Eds.), *11th international congress on engineering and food* (Vol. 1, pp. 1209-1215).
- Thussu, S., Datta, A. K.** (2012). Texture prediction during deep frying: A mechanistic approach. *Journal of Food Engineering*, 108(1), 111-121.
- Tornberg, E.** (2005). Effects of heat on meat proteins - implications on structure and quality of meat products. *Meat Sci*, 70(3), 493-508.
- Tornberg, E.** (2013). Engineering processes in meat products and how they influence their biophysical properties. *Meat Science*, 95(4), 871-878.
- Tørngren, M.** (2003). *Effect of packing method on colour and eating quality of beef loin steaks*. Paper presented at the The 49th International Congress of Meat Science and Technology, Campinas, Brazil.
- Trevisan, A. J. B., Lima, D. D., Sampaio, G. R., Soares, R. A. M., Bastos, D. H. M.** (2016). Influence of home cooking conditions on maillard reaction products in beef. *Food Chemistry*, 196, 161-169.
- Tronsmo, K. M., Magnus, E. M., Baardseth, P., Schofield, J. D., Aamodt, A., Faergestad, E. M.** (2003). Comparison of small and large deformation rheological properties of wheat dough and gluten. *Cereal Chemistry*, 80(5), 587-595.
- Trout, G. R.** (1989). Variation in myoglobin denaturation and color of cooked beef, pork, and turkey meat as influenced by pH, sodium chloride, sodium tripolyphosphate and cooking temperature. *Journal of Food Science*, 54(3), 536-540.
- Trystram, G.** (2012). Modelling of food and food processes. *Journal of Food Engineering*, 110(2), 269-277.
- Tudorica, C. M., Kuri, V., Brennan, C. S.** (2002). Nutritional and physicochemical characteristics of dietary fiber enriched pasta. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(2), 347-356.
- Turabi, E., Sumnu, G., Sahin, S.** (2008). Rheological properties and quality of rice cakes formulated with different gums and an emulsifier blend. *Food Hydrocolloids*, 22(2), 305-312.
- Turgut, Y., Turgut, S. S., Karacabey, E.** (2021). Use of ohmic heating as an alternative method for cooking pasta. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(13), 5529-5540.
- Turkmen, N., Poyrazoglu, E. S., Sari, F., Velioglu, Y. S.** (2006). Effects of cooking methods on chlorophylls, pheophytins and colour of selected green vegetables. *International Journal of Food Science and Technology*, 41(3), 281-288.

- Turkmen, N., Sari, F., Velioglu, Y. S.** (2005). The effect of cooking methods on total phenolics and antioxidant activity of selected green vegetables. *Food Chemistry*, 93(4), 713-718.
- UNE-CTN_213/SC_59.** (2019). UNE-EN 60350-2: Aparatos electrodomésticos de cocción. Parte 2: Encimeras. Métodos de medida de la aptitud a la función. In.
- Ureta, M. M., Diascorn, Y., Cambert, M., Flick, D., Salvadori, V. O., Lucas, T.** (2019). Water transport during bread baking: Impact of the baking temperature and the baking time. *Food Science and Technology International*, 25(3), 187-197.
- Ureta, M. M., Olivera, D. F., Salvadori, V. O.** (2014). Baking of muffins: Kinetics of crust color development and optimal baking time. *Food and Bioprocess Technology*, 7(11), 3208-3216.
- Van Boekel, M.** (2008). Kinetic modeling of food quality: A critical review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7(1), 144-158.
- Van der Sman, R. G. M.** (2007). Moisture transport during cooking of meat: An analysis based on flory-rehner theory. *Meat Science*, 76(4), 730-738.
- Van der Sman, R. G. M.** (2013). Modeling cooking of chicken meat in industrial tunnel ovens with the Flory-Rehner theory. *Meat Science*, 95(4), 940-957.
- Van Laack, R., Berry, B. W., Solomon, M. B.** (1996). Effect of precooking conditions on color of cooked beef patties. *Journal of Food Protection*, 59(9), 976-983.
- Varnam, A., Sutherland, J., Sutherland, J. P.** (1995). *Meat and meat products: Technology, chemistry and microbiology* (Vol. 3): Springer Science & Business Media.
- Vaskoska, R., Ha, M., Tran, H. T., Khoshelham, K., White, J. D., Warner, R. D.** (2020). Evaluation of 3d laser scanning for estimation of heating-induced volume shrinkage and prediction of cooking loss of pork cuboids compared to manual measurements. *Food and Bioprocess Technology*, 13(6), 938-947.
- Velíšek, J.** (2014). *The chemistry of food* (First Edition ed.): John Wiley & Sons, Ltd.
- Verkerk, R.** (2002). *Evaluation of glucosinolate levels throughout the production chain of brassica vegetables: Towards a novel predictive modelling approach*. University of Wageningen, Wageningen, Netherlands
- Vieira, C., Diaz, M. T., Martínez, B., García-Cachán, M. D.** (2009). Effect of frozen storage conditions (temperature and length of storage) on microbiological and sensory quality of rustic crossbred beef at different states of ageing. *Meat Science*, 83(3), 398-404.
- Vignola, M. B., Bustos, M. C., Perez, G. T.** (2018). Comparison of quality attributes of refined and whole wheat extruded pasta. *LWT-Food Science and Technology*, 89, 329-335.
- Vinha, A. F., Alves, R. C., Barreira, S. V. P., Costa, A. S. G., Oliveira, M.** (2015). Impact of boiling on phytochemicals and antioxidant activity of green vegetables consumed in the mediterranean diet. *Food & Function*, 6(4), 1157-1163.

- Wachtel-Galor, S., Wong, K. W., Benzie, I. F. F.** (2008). The effect of cooking on *Brassica* vegetables. *Food Chemistry*, 110(3), 706-710.
- Wählby, U., Skjöldebrand, C.** (2002). Reheating characteristics of crust formed on buns, and crust formation. *Journal of Food Engineering*, 53(2), 177-184.
- Walsh, D. E.** (1971). Measuring spaghetti firmness. *Cereal Science Today*, 16(7), 202-209.
- Wang, F. C., Sun, X. S.** (2002). Creep-recovery of wheat flour doughs and relationship to other physical dough tests and breadmaking performance. *Cereal Chemistry*, 79(4), 567-571.
- Wang, H. Y., Qian, H., Yao, W. R.** (2011). Melanoidins produced by the Maillard reaction: Structure and biological activity. *Food Chemistry*, 128(3), 573-584.
- Wang, S. J., Copeland, L.** (2013). Molecular disassembly of starch granules during gelatinization and its effect on starch digestibility: A review. *Food & Function*, 4(11), 1564-1580.
- Wang, S. J., Li, C. L., Copeland, L., Niu, Q., Wang, S.** (2015). Starch retrogradation: A comprehensive review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(5), 568-585.
- Wang, Y., Liang, H., Xu, R., Lu, B., Song, X., Liu, B.** (2020). Effects of temperature fluctuations on the meat quality and muscle microstructure of frozen beef. *International Journal of Refrigeration*, 116, 1-8.
- Wang, Y., Tian, X. J., Liu, X. Z., Xing, J. F., Guo, C., Du, Y. H., Zhang, H., Wang, W. H.** (2022). Focusing on intramuscular connective tissue: Effect of cooking time and temperature on physical, textual, and structural properties of yak meat. *Meat Science*, 184.
- Wang, Y. F., Ngadi, M. O., Adedeji, A. A.** (2010). Shrinkage of chicken nuggets during deep-fat frying. *International Journal of Food Properties*, 13(2), 404-410.
- Warren, D. S., Woodman, J. S.** (1974). The texture of cooked potatoes: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 25(2), 129-138.
- Warriss, P. D.** (2000). *Meat science: An introductory text*: CABI Publishing.
- Wattanachant, S., Benjakul, S., Ledward, D. A.** (2005). Effect of heat treatment on changes in texture, structure and properties of thai indigenous chicken muscle. *Food Chemistry*, 93(2), 337-348.
- West, R., Duizer, L., Seetharaman, K.** (2013). The effect of drying and whole grain content on the pasting, physicochemical and qualitative properties of pasta. *Starch-Starke*, 65(7-8), 645-652.
- Wheeler, T. L., Miller, R. K., Savell, J. W., Cross, H. R.** (1990). Palatability of chilled and frozen beef steaks. *Journal of Food Science*, 55(2), 301-304.
- Whistler, R., Daniel, J.** (1984). Molecular structure of starch. In R., W., J., B., and E., P. (Eds.), *Starch: Chemistry and technology* (pp. 153-182). Academic Press. NY. USA: Elsevier.

- Wichchukit, S., Zorrilla, S. E., Singh, R. P.** (2001). Contact heat transfer coefficient during double-sided cooking of hamburger patties. *25*(3), 207-221.
- Wilderjans, E., Luyts, A., Brijs, K., Delcour, J. A.** (2013). Ingredient functionality in batter type cake making. *Trends in Food Science & Technology*, *30*(1), 6-15.
- Willats, W. G. T., Knox, P., Mikkelsen, J. D.** (2006). Pectin: New insights into an old polymer are starting to gel. *Trends in Food Science & Technology*, *17*(3), 97-104.
- Willhoft, E. M. A.** (1973). Mechanism and theory of staling of bread and baked goods, and associated changes in textural properties. *4*(3), 292-322.
- Wills, R., McGlasson, B., Graham, D., Joyce, D.** (1998). *Introducción a la fisiología y manipulación poscosecha de frutas, hortalizas y plantas ornamentales* (Acribia Ed. 2ª ed.). Zaragoza (España).
- Wilmore, J. , Costill, D.** (2010). *Fisiología del esfuerzo y del deporte* (Paidotribo Ed. 6ª ed.).
- Wójtowicz, A., Mościcki, L.** (2014). Influence of legume type and addition level on quality characteristics, texture and microstructure of enriched precooked pasta. *LWT - Food Science and Technology*, *59*(2, Part 1), 1175-1185.
- Wolever, T. M. S., Jenkins, D. J. A., Kalmusky, J., Giordano, C., Giudici, S., Jenkins, A. L., Thompson, L. U., Wong, G. S., Josse, R. G.** (1986). Glycemic response to pasta: Effect of surface area, degree of cooking, and protein enrichment. *Diabetes Care*, *9*(4), 401-404.
- Woomer, J. S., Adediji, A. A.** (2021). Current applications of gluten-free grains - A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *61*(1), 14-24.
- Wootton, M., Chaudhry, M. A.** (1980). Gelatinization and in vitro digestibility of starch in baked products. *Journal of Food Science*, *45*(6), 1783-1784.
- Wright, D. J., Leach, I. B., Wilding, P.** (1977). Differential scanning calorimetric studies of muscle and its constituent proteins. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *28*(6), 557-564.
- Wu, A., Chang, W. H.** (1990). Influence of precooking on the firmness and pectic substances of three stem vegetables. *International Journal of Food Science & Technology*, *25*(5), 558-565.
- Wu, H., Sarko, A.** (1978). The double-helical molecular structure of crystalline b-amylose. *Carbohydrate Research*, *61*, 27-40.
- Xiong, Z., Sun, D.-W., Dai, Q., Han, Z., Zeng, X.-A., Wang, L.** (2015). Application of visible hyperspectral imaging for prediction of springiness of fresh chicken meat. *Food Analytical Methods*, *8*(2), 380-391.
- Xu, B. J., Chang, S. K. C.** (2008). Total phenolics, phenolic acids, isoflavones, and anthocyanins and antioxidant properties of yellow and black soybeans as affected by thermal processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *56*(16), 7165-7175.

- Yam, K. L., Papadakis, S. E.** (2004). A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering*, 61(1), 137-142.
- Yamaguchi, T., Mizobuchi, T., Kajikawa, R., Kawashima, H., Miyabe, F., Terao, J., Takamura, H., Matoba, T.** (2001). Radical-scavenging activity of vegetables and the effect of cooking on their activity. *Food Science and Technology Research*, 7(3), 250-257.
- Yancey, J. W. S., Wharton, M. D., Apple, J. K.** (2011). Cookery method and end-point temperature can affect the Warner-Bratzler shear force, cooking loss, and internal cooked color of beef longissimus steaks. *Meat Science*, 88(1), 1-7.
- Yarmand, M. S., Nikmaram, P., Djomeh, Z. E., Homayouni, A.** (2013). Microstructural and mechanical properties of camel longissimus dorsi muscle during roasting, braising and microwave heating. *Meat Science*, 95(2), 419-424.
- Yazici, G. N., Ozer, M. S.** (2021). A review of egg replacement in cake production: Effects on batter and cake properties. *Trends in Food Science & Technology*, 111, 346-359.
- Young, O. A., West, J., Hart, A. L., van Otterdijk, F. F. H.** (2004). A method for early determination of meat ultimate pH. *Meat Science*, 66(2), 493-498.
- Zanoni, B., Peri, C., Bruno, D.** (1995). Modelling of browning kinetics of bread crust during baking. *LWT - Food Science and Technology*, 28(6), 604-609.
- Zell, M., Lyng, J. G., Cronin, D. A., Morgan, D. J.** (2010). Ohmic cooking of whole turkey meat - Effect of rapid ohmic heating on selected product parameters. *Food Chemistry*, 120(3), 724-729.
- Zeng, J., Li, G. L., Gao, H. Y., Ru, Z. G.** (2011). Comparison of A and B starch granules from three wheat varieties. *Molecules*, 16(12), 10570-10591.
- Zhan, L. J., Pang, L. Y., Ma, Y. D., Zhang, C. C.** (2018). Thermal processing affecting phytochemical contents and total antioxidant capacity in broccoli (*Brassica oleracea* L.). *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(3).
- Zhang, B. J., Chen, L., Zhao, Y., Li, X. X.** (2013). Structure and enzymatic resistivity of debranched high temperature-pressure treated high-amylose corn starch. *Journal of Cereal Science*, 57(3), 348-355.
- Zhang, J., Chen, L., Cui, J. H., Xiao, L., Wang, Z. W.** (2014). Physicochemical property of starch-pectin conjugates with resistance to enzymatic activity. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(8), 1505-1512.
- Zhang, J., Datta, A. K.** (2006). Mathematical modeling of bread baking process. *Journal of Food Engineering*, 75(1), 78-89.
- Zhang, L., Doursat, C., Vanin, F. M., Flick, D., Lucas, T.** (2017). Water loss and crust formation during bread baking, part I: Interpretation aided by mathematical models with highlights on the role of local porosity. *Drying Technology*, 35(12), 1506-1517.

- Zhang, L., Putranto, A., Zhou, W., Boom, R. M., Schutyser, M. A. I., Chen, X. D.** (2016). Miniature bread baking as a timesaving research approach and mathematical modeling of browning kinetics. *Food and Bioproducts Processing*, 100, 401-411.
- Zheng, C., Sun, D. W., Zheng, L. Y.** (2007). Predicting shrinkage of ellipsoid beef joints as affected by water immersion cooking using image analysis and neural network. *Journal of Food Engineering*, 79(4), 1243-1249.
- Zhong, X. Y., Dolan, K. D., Almenar, E.** (2015). Effect of steamable bag microwaving versus traditional cooking methods on nutritional preservation and physical properties of frozen vegetables: A case study on broccoli (*Brassica oleracea*). *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 31, 116-122.
- Zhou, Z., Robards, K., Helliwell, S., Blanchard, C.** (2007). Effect of storage temperature on cooking behaviour of rice. *Food Chemistry*, 105(2), 491-497.
- Zielbauer, B. I., Franz, J., Viezens, B., Vilgis, T. A.** (2016). Physical aspects of meat cooking: Time dependent thermal protein denaturation and water loss. *Food Biophysics*, 11(1), 34-42.
- Zweifel, C., Handschin, S., Escher, F., Conde-Petit, B.** (2003). Influence of high-temperature drying on structural and textural properties of durum wheat pasta. *Cereal Chemistry*, 80(2), 159-167.