

# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

**" CAMBIOS EN COLOR Y DUREZA EN VEGETALES  
SOMETIDOS A CALENTAMIENTO POR MICROONDAS "**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO EN ALIMENTOS**  
P R E S E N T A:  
**CARLOS FELICIANO OSORNIO MUÑOZ**

**ASESOR:**  
**I. A. FRANCISCO JAVIER LOPEZ MARTINEZ**

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

2009

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES CUAUTITLÁN



Departamento de  
Exámenes Profesionales

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Cambios en color y dureza en vegetales sometidos a calentamiento  
por microondas

que presenta el pasante: Carlos Feliciano Osorio Muñoz  
con número de cuenta: 9338330-7 para obtener el título de:  
Ingeniero en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 5 de Septiembre de 2001

PRESIDENTE

I.A. Laura M. Cortazar Figueroa

VOCAL

I.A. Francisco Javier López Martínez

SECRETARIO

I.A. Ma. Eugenia Ramírez Ortiz

PRIMER SUPLENTE

M. en C. Ma. de la Luz Zambrano Zaragoza

SEGUNDO SUPLENTE

I.A. Victor Manuel Avalos Avila

Dedico este trabajo, con todo mi amor, a quienes han sido los mejores y más sinceros guías, y a quienes debo todo lo que ahora soy. Gracias, Alicia y Carlos, por darme la vida y permitirme vivirla a su lado.

Misión cumplida.

Este logro también es de ustedes. Los amo.

Por que aunque no siempre es fácil ser hermanos, eres una de las personas con quien he compartido muchos de los mejores momentos de mi vida. Te quiero mucho, Karla.

A mis amigos del alma, con quienes he compartido todo y cuya amistad sé que siempre tendré, aún cuando nuestras vidas tomen caminos distintos, especialmente a Aarón Gómez, Antonio Chacón, Astrid Landaverde, Bania Flores, Berenice Cruz Prieto, Diana Miranda, J. Antonio Martínez, Fadia González Ayúb, Georgina Valero, Greta Vega, Mónica Silva y Roberto Toriz.

Asimismo, agradezco sinceramente a todos los profesores que, en su ejercicio cotidiano, realizaron valiosas aportaciones a mi formación universitaria, especialmente a mi asesor, I.A. Francisco Javier López Martínez y a la I.B.Q. Leticia Figueroa Villarreal, a quienes expreso mi gratitud y aprecio.

## INDICE GENERAL

	<i>Página</i>
<b>INDICE GENERAL</b>	<b>I</b>
<b>INDICE DE CUADROS, FIGURAS Y GRÁFICAS</b>	<b>IV</b>
<b>NOMENCLATURA</b>	<b>VIII</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>CAPITULO UNO. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR</b>	<b>4</b>
1.1.- TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONDUCCIÓN	5
1.2.- TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN	5
1.3.- TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN	6
<b>CAPITULO DOS. CALENTAMIENTO POR MICROONDAS</b>	<b>7</b>
2.1.- INTRODUCCIÓN	7
2.2.- GENERALIDADES	8
2.2.1.- Campos de fuerza	8
2.3.- MECANISMOS DE CALENTAMIENTO POR MICROONDAS	13
2.4.- LAS MICROONDAS Y SU INTERACCIÓN CON LA MATERIA	14
2.4.1.- Interacción iónica	14
2.4.2.- Interacción dipolar	15
2.5.- ENERGÍA, PODER Y CALENTAMIENTO	17
2.6.- FUNCIONAMIENTO DEL HORNO DE MICROONDAS	19
2.6.1.- El sistema de calentamiento	20
2.6.2.- Factores que afectan la velocidad de calentamiento	22
2.7.- EL COMPORTAMIENTO DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS CON LA MATERIA Y LAS PROPIEDADES DIELECTRICAS DE LOS ALIMENTOS	24
2.7.1.- Reflexión	24

2.7.2.- Absorción	25
2.7.3.- Transmisión	25
2.7.4.- Significado físico de $\epsilon$ , $\epsilon'$ y $\epsilon''$ .	27
2.7.5.- Profundidad de penetración	32
2.8.- APLICACIÓN DE MICROONDAS EN ALIMENTOS	34
<b>CAPITULO TRES. ALIMENTOS, PROPIEDADES MECÁNICAS Y TEXTURA</b>	<b>38</b>
3.1.- GENERALIDADES	38
3.2.- ALGUNAS REFLEXIONES SOBRE MATERIALES	39
3.3.- ALGUNAS REFLEXIONES SOBRE LA EVALUACIÓN DE TEXTURA	42
3.4.- EVALUACIÓN DE LA TEXTURA	44
3.4.1.- Pruebas puntuales	44
<b>CAPITULO CUATRO. COLOR</b>	<b>46</b>
4.1.- FUENTES DE LUZ	46
4.2.- DETECCIÓN DE LUZ Y COLOR	47
4.3.- DESCRIPCIÓN DEL COLOR	47
4.4.- EL SISTEMA CIE	48
4.5.- SISTEMAS DE TIPO OPUESTO	49
4.6.- DIFERENCIAS DE COLOR	50
<b>CAPITULO CINCO. LAS BASES QUÍMICO-FISIOLÓGICAS DE CALIDAD EN ALIMENTOS DE ORIGEN VEGETAL</b>	<b>52</b>
5.1.- COLOR Y PIGMENTOS	53
5.1.1.- Clorofilas	53
5.1.2.- Carotenoides	55
5.1.3.- Antocianinas	57
5.1.4.- Antoxantinas	57
5.1.5.- Pigmentos derivados de reacciones enzimáticas y no enzimáticas	58
5.2.- TEXTURA	58
5.2.1.- Efectos del cocimiento sobre la textura de las verduras	60

<b>CAPITULO SEIS. LOS OBJETOS DE ESTUDIO</b>	<b>62</b>
6.1.- PAPA ( <i>Solanum tuberosum</i> )	62
6.2.- ZANAHORIA ( <i>Daucus carota</i> )	65
6.3.- CHILE ( <i>Capsicum spp.</i> )	69
6.3.1.- Chile jalapeño ( <i>Capsicum annuum</i> )	70
<b>CAPITULO SIETE. DISEÑO EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA</b>	<b>74</b>
7.1.- CUADRO METODOLÓGICO	74
7.2.- DISEÑO EXPERIMENTAL	76
<b>CAPITULO OCHO. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>85</b>
8.1.- CARACTERIZACION DEL HORNO DE MICROONDAS	85
8.1.1.-Determinación de la zona de mayor incidencia electromagnética	85
8.2.- DETERMINACIÓN DE LA PERDIDA DE DUREZA Y VARIACIÓN DE COLOR	86
8.2.1.-Determinación de los tiempos de calentamiento	86
8.2.2.- Pérdida de dureza y variación de color en zanahoria	87
8.2.3.- Pérdida de dureza y variación de color en papa	92
8.2.4.- Pérdida de dureza y variación de color en chile jalapeño	97
8.3.- TRATAMIENTO MATEMÁTICO	101
<b>CAPITULO NUEVE. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>111</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>113</b>

## INDICE DE CUADROS, FIGURAS Y GRÁFICAS

Página

### Cuadros

Cuadro No. 1.- Composición media de <i>Solanum tuberosum</i>	64
Cuadro No. 2.- Composición media de <i>Daucus carota</i>	68
Cuadro No. 3.- Composición media de <i>Capsicum spp.</i>	71
Cuadro No. 4.- Valores promedio obtenidos de Qo y tiempo	85
Cuadro No. 5.-Tiempos máximos y mínimos de calentamiento	87
Cuadro No. 6.- Resultados obtenidos en zanahoria	88
Cuadro No. 7.- Resultados obtenidos en papa	92
Cuadro No. 8.- Resultados obtenidos en chile	97
Cuadro No. 9.-Datos comparativos de dureza en zanahoria	105
Cuadro No. 10.-Datos comparativos de dureza en papa	107
Cuadro No. 11.-Datos comparativos de dureza en chile	109

### Figuras

Fig.2.1.- Campo estático	9
Fig.2.2.- Campo alterno	9

Fig.2.3.- Onda cuadrada	10
Fig.2.4.- Onda sinusoidal	11
Fig.2.5.- El espectro electromagnético	13
Fig.2.6.- Interacción iónica	15
Fig.2.7.- Interacción dipolar	16
Fig.2.8.- Diagrama de un sistema de calentamiento por microondas	21
Fig.2.9.- Reflexión, Absorción y Transmisión de microondas en un medio dieléctrico	26
Fig.2.10.- Factor de pérdida dieléctrica vs. frecuencia	28
Fig.2.11.- $\epsilon''_0$ vs. frecuencia	30
Fig.2.12.- Constantes dieléctricas de alimentos vs. Temperatura	31
Fig.2.13.- Factor de pérdida dieléctrica en alimentos vs. Temperatura	32
Fig.3.1.- Gráfica Esfuerzo-Deformación	42
Fig.4.1.- El sistema coordenado L, a, b	50
Fig.6.1.- Fórmula estructural de los capsaicinoides	73
Fig.7.1.- Zonas en que fue seccionado el horno de microondas (vista superior)	78

Fig.7.2.- Zonas de medición en zanahoria	83
Fig.7.3.- Zonas de medición en papa	83
Fig.7.4.- Zonas de medición en chile	84

#### Gráficas

GRÁFICA 1.- PERDIDA DE DUREZA EN ZANAHORIA RESPECTO AL TIEMPO DE CALENTAMIENTO	89
GRÁFICA 2.- PERDIDA DE DUREZA EN ZANAHORIA RESPECTO A LA CANTIDAD DE MASA	89
GRÁFICA 3.- VARIACIÓN DE COLOR EN ZANAHORIA RESPECTO AL TIEMPO DE CALENTAMIENTO (EXPRESADO COMO $\Delta E$ )	90
GRÁFICA 4.- VARIACIÓN DE COLOR EN ZANAHORIA RESPECTO A LA CANTIDAD DE MASA (EXPRESADO COMO $\Delta E$ )	90
GRÁFICA 5.- PERDIDA DE DUREZA EN PAPA RESPECTO AL TIEMPO DE CALENTAMIENTO	93
GRÁFICA 6.- PERDIDA DE DUREZA EN PAPA RESPECTO A LA CANTIDAD DE MASA	94
GRÁFICA 7.- VARIACIÓN DE COLOR EN PAPA RESPECTO AL TIEMPO DE CALENTAMIENTO (EXPRESADO COMO $\Delta E$ )	94
GRÁFICA 8.- VARIACIÓN DE COLOR EN PAPA RESPECTO A LA CANTIDAD DE MASA (EXPRESADO COMO $\Delta E$ )	95

<b>GRÁFICA 9.- PERDIDA DE DUREZA EN CHILE RESPECTO AL TIEMPO DE CALENTAMIENTO</b>	<b>98</b>
<b>GRÁFICA 10.- PERDIDA DE DUREZA EN CHILE RESPECTO A LA CANTIDAD DE MASA</b>	<b>98</b>
<b>GRÁFICA 11.- VARIACIÓN DE COLOR EN CHILE RESPECTO AL TIEMPO DE CALENTAMIENTO (EXPRESADO COMO <math>\Delta E</math>)</b>	<b>99</b>
<b>GRÁFICA 12.- VARIACIÓN DE COLOR EN CHILE RESPECTO A LA CANTIDAD DE MASA (EXPRESADO COMO <math>\Delta E</math>)</b>	<b>99</b>
<b>GRAFICA 13.-CONSERVACIÓN DE DUREZA EN ZANAHORIA</b>	<b>103</b>
<b>GRAFICA 14.- PENDIENTE (GRAFICA 13) VS. MASA</b>	<b>104</b>
<b>GRAFICA 15.-CONSERVACIÓN DE DUREZA EN PAPA</b>	<b>106</b>
<b>GRAFICA 16.- PENDIENTE (GRAFICA 15) VS. MASA</b>	<b>107</b>
<b>GRAFICA 17.-CONSERVACIÓN DE DUREZA EN CHILE</b>	<b>108</b>
<b>GRAFICA 18.- PENDIENTE (GRAFICA 17) VS. MASA</b>	<b>108</b>

## NOMENCLATURA

### Letras

cal = Calorías

$^{\circ}\text{C}$  = Grado centígrado

cm = Centímetro

Cp = Calor específico

d = r = Período

$d_p$  = Profundidad de penetración

E = Campo eléctrico

$E$  = Energía de un fotón

f = Frecuencia de oscilación

f = Frecuencia

$f_c$  = Frecuencia crítica

G = Giga

gf = Gramos fuerza

g = Gramo

Hz = Hertz o Hertzio

J = Joule

K = Kelvin (grado)

k = Kilo

L = Litro

Log = Logaritmo

m = Metro

mm = Milímetro

M = Mega

mg = Miligramo

min = Minuto

nm = Nanómetro

P = Razón de absorción de energía

Po = Fracción de energía transmitida por un material

Pr = Fracción de energía reflejada

Pv = Energía absorbida por unidad de volumen  
 $P_{(e)}/P_o$  = Fracción de energía dentro de un material  
Qo = Cantidad de calor  
r = Período de oscilación  
s = Segundo  
t = Tiempo  
V = Volumen  
v = Volt  
w = Watt  
z = Distancia

#### *Letras griegas*

$\Delta E$  = Diferencia de color  
 $\Delta T$  = ( $T_{FINAL} - T_{INICIAL}$ ) = Diferencia de temperaturas  
 $\epsilon = \epsilon_o$  = Permitividad dieléctrica real o constante dieléctrica real  
 $\epsilon'$  = Permitividad dieléctrica teórica (constante)  
 $\epsilon'' = \epsilon''_T$  = Factor de pérdida dieléctrica total  
 $\epsilon''_o$  = Factor de pérdida dieléctrica debida a la interacción iónica  
 $\epsilon''_p$  = Factor de pérdida dieléctrica debida a la interacción polar  
 $\epsilon^{1/2}$  = Equivalente al índice de refracción  $n$   
 $\lambda$  = Longitud de onda  
 $\mu$  = Permeabilidad magnética real o constante magnética real  
 $\mu'$  = Permeabilidad magnética teórica (constante)  
 $\mu''$  = Factor de pérdida magnética  
 $\rho$  = Densidad

#### *Constantes matemáticas*

c = Velocidad de la luz (= 300,000 Km/s aprox.)  
e = Logaritmo neperiano (= 2.781)  
h = Constante de Planck (=  $6.626 \times 10^{-34}$ )  
i =  $-1^{1/2}$  (número complejo)  
 $\pi$  (= 3.141592 aprox.)

## INTRODUCCIÓN

El mundo de la ingeniería se caracteriza por la dinámica con la que sus constantes innovaciones revolucionan los medios de producción hoy en día. La ingeniería de alimentos, como tal, no es ajena a este carácter dinámico. La búsqueda de tecnologías y procesos que deriven en la obtención de alimentos cuya calidad sea cada vez mayor parece no tener un límite, e impulsados por necesidades específicas de consumidores cada vez más exigentes, los científicos, ingenieros y tecnólogos han tenido que incurrir en campos más especializados de otras ramas de investigación científica, llegando incluso, a echar mano de adelantos surgidos a partir de investigaciones enfocadas a fines tan opuestos como por ejemplo, los bélicos. Tal es el caso de la física nuclear y las microondas.

Estas últimas constituyen una de las tecnologías que al parecer podrían otorgar interesantes ventajas sobre algunos de los métodos tradicionales de procesamiento de alimentos que impliquen algún tipo de transferencia de calor, minimizando, al menos en teoría, los daños o modificaciones que los alimentos sufren al verse sometidos a procesos tales como escaldado, homeo, cocción, deshidratación, pasteurización, etc.

Son los alimentos de origen vegetal los que merecen especial atención en este sentido dadas las formas crudas y/o mínimamente procesadas en las que se comercializan, ya que sus características cualitativas, familiares a la gran mayoría de los consumidores, deberán mantenerse casi intactas en aras de una total aceptación.

De los cuatro factores que algunos autores citan como constituyentes de la calidad de un vegetal (o un alimento en general), es decir, color, dureza, sabor y valor nutritivo, serán los primeros dos en los que centraremos nuestra atención a lo largo del presente trabajo, el cual tiene como propósito final establecer una referencia respecto a los cambios en color y dureza que sufren algunos alimentos vegetales al ser sometidos a un calentamiento por medio de microondas y que dicha referencia pueda ser aplicable a algunas operaciones que permitan el uso de las mismas. Cabe aclarar que, en ningún momento, el presente trabajo tuvo como finalidad el confrontar los efectos producidos

por el empleo de microondas sobre los parámetros citados anteriormente contra los producidos por otras operaciones que impliquen modificaciones en color y dureza debidas a la transmisión de calor.

De entre toda la gama de productos vegetales de interés para la industria alimentaria, se decidió trabajar con tres de las especies que tiene mayor presencia en el mercado, a saber, la zanahoria, la papa y el chile, dada la variedad de coloraciones y durezas que los mismos ofrecen *per sé*.

Este trabajo partió de la suposición de que a través del procesamiento de vegetales por medio de microondas, se pueden obtener productos cuyas características de dureza y color se verán mínimamente alteradas, y aunque esto no fue posible en todos los casos, los resultados obtenidos demuestran que las microondas pudiera llegar a convertirse en un importante medio para el procesamiento de algunos tipos de alimentos en un futuro, tal vez, no muy lejano.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Determinación y cuantificación de los cambios en color y dureza presentados en papa, zanahoria y chile tras ser sometidos a calentamiento por microondas.

### **OBJETIVOS PARTICULARES**

Delimitar el área de mayor incidencia electromagnética dentro del sistema de calentamiento por microondas a emplear.

Determinar la influencia que ejerce el tiempo de calentamiento sobre los cambios en color y dureza en papa, zanahoria y chile.

Determinar la influencia que ejerce la cantidad de masa sometida a calentamiento por microondas sobre los cambios en color y dureza en papa, zanahoria y chile.

### **HIPÓTESIS GENERAL**

La variación de color y Pérdida de textura en alimentos sometidos a calentamiento por microondas siguen un comportamiento de cinética de primer orden.

## CAPITULO UNO

### MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La energía, ya sea que se aplique o se retire, interviene en muchas de las etapas consistentes en la preparación de alimentos. Por ejemplo, el calor se utiliza para remover el exceso de humedad, para alterar la textura, disminuir volumen, inactivar microorganismos y/o enzimas al interior o encima de la superficie de los alimentos, alterar sabor, inducir cambios estructurales, etc. Cuando una sustancia se calienta, las moléculas se colocan en una fase de movimiento o se agitan. Si el calentamiento se realiza con un calentador de gas, la energía que pone y mantiene a las moléculas en movimiento, se obtiene a través de una combustión. La resistencia al paso de una corriente eléctrica a través de las espiras de un elemento de calentamiento, es la fuente de calor en una parrilla eléctrica.

Los alimentos se cocinan convencionalmente a partir de gas o electricidad, o más recientemente, empleando fuentes electromagnéticas (energía en forma de ondas de radio de alta frecuencia o microondas). La conductividad y difusión térmica describen la transmisión de calor característica de sustancias alimenticias y la rapidez con que el producto se calienta o enfría durante un tratamiento térmico. El calor se transmite por tres mecanismos diferentes, denominados conducción, convección y radiación. La conducción es el principal mecanismo de transferencia de calor en materiales sólidos, mientras que la convección es aplicada principalmente a los fluidos. En los procesos de transmisión de calor por radiación, la energía se transmite por medio de ondas electromagnéticas, es decir, infrarrojo, ultravioleta o microondas. Muchas operaciones no están limitadas a un solo mecanismo. En un intercambiador de calor, el calor se transfiere de un fluido a otro a través de un tubo o placa mecánica, involucrando de esta manera al calentamiento por conducción y convección. En el calentamiento por infrarrojos o microondas, la energía es transportada a la superficie o disipada dentro del alimento por radiación, mientras que los efectos del calentamiento local son dispersados por conducción.

## 1.1.- TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONDUCCIÓN

Si se calienta un extremo de una barra metálica, la energía cinética de las moléculas aumenta y la temperatura se eleva, apareciendo un gradiente de temperatura que propiciará la transmisión de calor a lo largo de la barra. El mecanismo exacto de este proceso de transferencia de energía está lejos de ser explicado satisfactoriamente (Kern, 1998), pero se supone que existen dos factores que contribuyen mayoritariamente al proceso: la energía de vibración dentro de la estructura (vibraciones que se transmiten de molécula a molécula a lo largo de la barra), y por medio de una nube de electrones que se mueven libremente a través del entramado estructural. Los materiales se diferencian en su capacidad para conducir el calor, y los metales son generalmente mucho mejores conductores que los no metales. La conductividad térmica es una propiedad que se utiliza para cuantificar la capacidad de una sustancia para conducir el calor. Si bien debe ser posible predecir la conductividad térmica de una sustancia a partir del conocimiento de su estructura molecular, esto no es siempre enteramente cierto (*op cit.* Kern).

## 1.2.- TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN

El calor se transmite en líquidos y gases por el movimiento global de las moléculas; este proceso se conoce como convección. La distribución de calor y la eliminación de gradientes de temperatura se lleva a cabo por medio de movimiento molecular. Se consideran dos tipos de convección: natural y forzada. Supongamos que deseamos calentar el agua contenida en un vaso de precipitados. El agua situada en la proximidad de la fuente de calor aumenta su temperatura al mismo tiempo que su densidad disminuye. El agua caliente asciende y es remplazada por agua fría por puro efecto de diferencia de densidades estableciéndose así una circulación en el interior del fluido. Tal proceso de transmisión de calor se conoce como convección libre o natural. Si el agua se agita con una varilla, la energía externa alcanza todo el sistema, se induce una turbulencia artificial y se llega a un proceso de convección forzada y consecuentemente, la transmisión de calor se ve incrementada (Eckert, 1972; *op cit.* Kern).

### 1.3.- TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN

Todos los objetos emiten radiaciones electromagnéticas a una temperatura superior a los 0 K; las características de esta radiación dependerán de la naturaleza de la sustancia y de su temperatura. Esta radiación viajará a través del vacío a la velocidad de la luz, siendo reflejada, transmitida o absorbida al hacer contacto con algún objeto. De nuevo, esto depende de las propiedades de este objeto. Solamente la radiación absorbida transmitirá su energía y dará lugar a un cambio de temperatura (*idem*).

## CAPITULO DOS

### CALENTAMIENTO POR MICROONDAS

#### 2.1.- INTRODUCCIÓN

Desde finales del siglo pasado se sabe que los campos electromagnéticos de alta frecuencia actúan sobre los sistemas biológicos: la temperatura de los animales de laboratorio aumenta claramente al ser expuestos a ellas y algunas modificaciones en bacterias y en las toxinas de las mismas tiene lugar. Aunque algunos científicos consideraron que parte de los efectos observados estaban ligados a las radiaciones y eran independientes del calentamiento producido, parece claro —al menos en lo que respecta a aplicaciones en alimentos—, que las acciones que se observan son exclusivamente resultado del aumento de temperatura (Potter, 1978).

Este calentamiento por inducción magnética que se produce en un material no conductor de electricidad (es decir, dieléctrico), colocado en un campo de alta frecuencia ( $10^7$  a  $10^{10}$  Hz), también se llama dieléctrico por hiperfrecuencias, por ondas de radio o, más comúnmente, por microondas.

Un alimento colocado en un campo electromagnético, absorbe energía y la transforma en calor, debido especialmente a las fricciones intermoleculares y a las oscilaciones moleculares de dipolos presentes en el medio, cambiando de orientación a cada cambio del sentido del campo, es decir, unas  $10^7$  a  $10^{10}$  veces por segundo. Estos mecanismos se abordarán más ampliamente posteriormente.

El correcto entendimiento respecto a la forma en que las microondas pueden ser empleadas en la industria alimenticia, requiere un completo conocimiento sobre su funcionamiento y conducta. En el caso de la ingeniería en alimentos, no se precisa de un profundo análisis matemático, sin embargo es necesario una mayor comprensión del tema desde el punto de vista meramente físico, así como de la interacción de las microondas con la materia.

## 2.2.- GENERALIDADES

### 2.2.1.- Campos de fuerza

Básicamente, existen en la naturaleza cinco tipos de fuerzas. Dos de ellas son de orden estrictamente atómico, por lo que no son de interés desde el punto de vista de las microondas. La más común de ellas es la gravedad, que representa la fuerza de atracción ejercida entre dos cuerpos en función de sus respectivas masas. Un ejemplo de ello es la fuerza con que todos los objetos sobre la superficie terrestre son atraídos a esta, es decir, gracias a la fuerza gravitacional o gravedad, es que podemos permanecer de pie sobre el piso (Buffler, 1993)

La segunda fuerza más común es el magnetismo. La tierra actúa como un inmenso y permanente imán, con un polo norte (desde donde son emanadas líneas magnéticas invisibles) y un polo sur (en donde terminan dichas líneas). El espacio comprendido entre el polo norte y el polo sur, recorrido por las líneas magnéticas es conocido como campo magnético, el cual, ejerciendo una fuerza de torque sobre una aguja magnetizada, constituye el principio de funcionamiento de una brújula magnética.

Bajo ciertas circunstancias, en algunos materiales como los semiconductores y por supuesto en los metales, los electrones negativamente cargados de un átomo, que se encuentran orbitando a los núcleos positivamente cargados, son capaces de moverse libremente a través del material. En otro tipo de materiales, los electrones pueden ser separados físicamente, con lo que es creado un campo de fuerza eléctrico entre las cargas separadas. La fuerza del campo dependerá tanto de la magnitud de las cargas como de la distancia que las separe.

El campo eléctrico es una cantidad vectorial, es decir, tiene una magnitud, un sentido y una dirección. Esta última está definida por la dirección en que una partícula positivamente cargada es acelerada al exponerse a un campo. La fuerza del campo se incrementará conforme aumenta el potencial o bien, conforme la separación de las cargas disminuya (Orear, 1990)

Para comprender mejor los conceptos de campo estático y alterno consideremos las siguientes figuras:

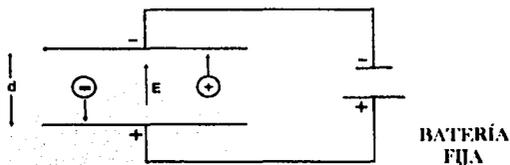


Fig 2.1.- Campo estático

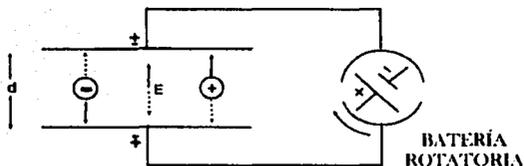


Fig 2.2.- Campo alterno

La batería rotatoria hace contacto con la placa por medio de dos electrodos semicirculares a través de conductores eléctricos. Conforme la batería gira, la placa superior se conecta con el electrodo negativo de la batería, y el electrodo positivo es conectado con la placa inferior. Después de un cuarto de vuelta, las conexiones se invierten y la placa negativa se convierte en positiva. El campo eléctrico en el primer caso se dirige hacia arriba y después, al girar la batería cambia su dirección hacia abajo. Entonces, una partícula cargada que se encuentra entre las placas es acelerada alternamente conforme cambia la dirección del campo eléctrico. La magnitud del campo eléctrico, como una función de la rotación y el tiempo se observa en la siguiente gráfica.

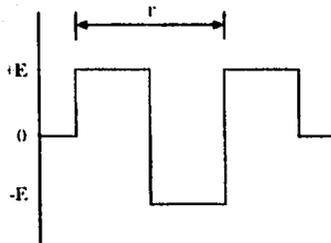


Fig. 2.3.- Onda cuadrada

Esta forma es llamada onda cuadrada. La rapidez con la que el campo cambia es determinada por la velocidad de rotación. Dicha velocidad es definida como la frecuencia de oscilación  $f$ , y está dada por el número de oscilaciones completas por tiempo  $[s^{-1}]$ .

El tiempo en que se lleva a cabo una oscilación completa es definida como período  $r$  [s], definida por

$$r = 1/f \quad (1)$$

Otro ejemplo de campo alterno se obtiene conectando un sistema semejante al anterior, sustituyendo la batería por corriente eléctrica doméstica. Debido a la forma en la que se genera la corriente, el potencial  $V$  (voltaje) va desde cero, incrementando su valor hasta un máximo en una dirección, retornando a cero; incrementa hasta un máximo en la otra dirección y retornará de nuevo a cero.

El campo eléctrico variará de igual forma entre las placas. La forma en que se representa esta variación recibe el nombre de onda sinusoidal. La frecuencia de una variación sinusoidal, o el número de oscilaciones por segundo de una onda se define por la unidad eléctrica, hertz (Hz).

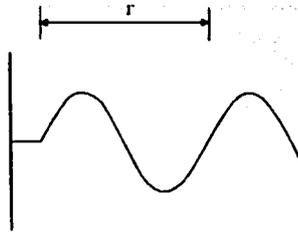


Fig. 2.4.- Onda sinusoidal

La frecuencia de la energía generada en México y en E. U. Es de 60 Hz, mientras que en Europa es de 50 Hz.

La radiación electromagnética consta de un campo eléctrico y un campo magnético perpendiculares; estos campos se encuentran normalmente en fase aunque pueden estar desfasados de su origen. Ambos campos varían de forma sinusoidal con el tiempo y la distancia, tal y como hemos visto. Toda la radiación electromagnética viaja a la velocidad de la luz en el vacío. El tipo de radiación está caracterizado por su longitud de onda  $\lambda$  o su frecuencia  $f$ . La relación entre ambas es la siguiente

$$\text{Frecuencia} \times \text{Longitud de onda} = \text{velocidad de la luz} \quad (2)$$

$$f \lambda = c \quad (3)$$

Donde la frecuencia es igual al número de ciclos que pasan por un observador en reposo en 1 segundo. Es medida en hertzios (Hz).

Las ondas de radio tienen las longitudes de onda mayores y las frecuencias más bajas, mientras que los rayos  $\gamma$  tienen las menores longitudes de onda y las mayores frecuencias.

Existe una discrepancia acerca de la naturaleza exacta de la radiación electromagnética; es útil imaginar que existe como paquetes discretos de energía o fotones. La cantidad de energía por fotón viene dada por la ecuación

$$E = hf \quad (4)$$

en donde:

$E$  = es la energía del fotón [J];

$h$  = es la constante de Planck ( $= 6.626 \times 10^{-34}$  J s), y

$f$  = es la frecuencia de la radiación.

Conforme aumenta la frecuencia, se incrementará la energía del fotón y la radiación se vuelve más nociva y peligrosa para la salud. Por consiguiente, la radiación electromagnética consta de una corriente de fotones, considerados como carentes de masa pero que poseen energía y cantidad de movimiento. Estos fotones interactúan con la materia y poseen energía suficiente como para ser letales a los tejidos vivos, romper enlaces químicos y dar lugar a fluorescencia o emitir electrones (Op. cit. Buffler).

La siguiente figura muestra las longitudes de onda y frecuencias respectivas de los principales tipos de radiación electromagnética.

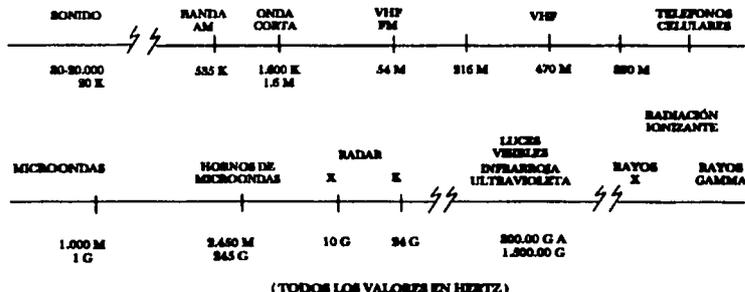


Fig.2.5.- El espectro electromagnético

### 2.3.- MECANISMOS DE CALENTAMIENTO POR MICROONDAS

Existe cierta confusión popular con relación a los hornos de microondas, por lo que es frecuente el escuchar afirmaciones como la de que el alimento es calentado desde el centro. Por tanto, antes de entender la forma en que funciona un horno de microondas, es necesario examinar cómo se absorbe la radiación de microondas en un material alimenticio. Para ello, examinaremos la radiación de hiperfrecuencia incidente en una sola superficie.

Conforme la onda pasa a través del alimento es atenuada, es decir, pierde energía. Esta energía es la que se convierte en calor en el punto mismo en que se pierde la energía. Cualquier gradiente de temperatura que se desarrolle dentro del alimento es eliminado por los procesos normales de conducción y/o convección (Cheftel, 1992).

Si la intensidad de la radiación incidente es  $P_0$  y la intensidad, tras una distancia  $d$ , ha sido reducida a  $P$ , entonces pueden haber ocurrido las siguientes dos situaciones extremas. En primer lugar, puede que se haya absorbido escasa cantidad de energía, sin el consiguiente efecto de calentamiento (comportamiento típico de los alimentos

congelados). Por el contrario, puede ser que toda la energía se absorba muy cerca de la superficie. En esta situación los efectos de calentamiento superficial predominarán y la onda penetrará escasamente en el alimento; esta es la situación que se presenta con la mayoría de los hornos infrarrojos y los procesos de calentamiento convencionales. Para un calentamiento uniforme a lo largo del alimento debería existir un descenso lineal en la intensidad conforme la onda penetra el alimento. No obstante, en la práctica, lo que ocurre normalmente es que aparece una pérdida de intensidad exponencial, es decir, se pierden fracciones iguales de la intensidad incidente a lo largo de las mismas distancias. Una forma adecuada de caracterizar tal pérdida exponencial se consigue empleando el término de *profundidad de penetración* (término estudiado más adelante). Una elevada profundidad de penetración indica que la radiación es escasamente absorbida mientras que, por el contrario, una profundidad de penetración corta indica que el calentamiento se llevará a cabo predominantemente a nivel superficial. Con pérdida exponencial de intensidad, el calentamiento no es totalmente uniforme; se absorbe proporcionalmente menos energía por unidad de volumen o masa conforme nos alejamos de la superficie; se disponen de gradientes de temperatura que son luego disipados por otros mecanismos de transferencia de calor (Lewis, 1993; Op. cit. Potter).

Después de todo, es cierta la afirmación de que el calentamiento se genera dentro del propio alimento.

## 2.4.- LAS MICROONDAS Y SU INTERACCIÓN CON LA MATERIA

### 2.4.1.- Interacción iónica

Si un generador eléctrico, oscilando a 2.45 GHz (rango de microondas) es conectado a dos placas paralelas, se creará un campo eléctrico que, en un ciclo completo, se alterará 2.45 billones de veces por segundo, es decir, el campo eléctrico cambiará de dirección (o polaridad) 2.45 billones de veces en un segundo. Sin embargo, en la cavidad de un horno de microondas, el campo no se manifiesta en una sola dirección, sino en 3: de arriba a abajo, de izquierda a derecha y de adelante hacia atrás.

Esto significa que cualquier partícula (o cualquier otro objeto) que se encuentre dentro de un horno, experimentará una fuerza de alternancia en las tres direcciones

ortogonales a razón de 2.45 veces por segundo. Si la partícula así acelerada choca con otra partícula adyacente, impartirá energía cinética a esta, con lo que la nueva partícula incrementará su agitación, y por tanto, su temperatura. Esta energía de agitación incrementada, o calor, se transfiere a otras partes del material. Esta transferencia de energía desde el campo electromagnético a las partículas agitadas es el mecanismo por medio del cual se lleva a cabo el calentamiento por microondas.

Muchos alimentos contienen agua en donde se disuelven sales de sodio, potasio, calcio, etc. Al disolverse, las moléculas se escinden en partículas llamadas iones. Los átomos de sodio, potasio y calcio se convierten en partículas cargadas positivamente (cationes) y son atraídos al cátodo o placa negativa. Los átomos de cloro, por ejemplo, se convierten en partículas cargadas negativamente (aniones), y son atraídos por el ánodo, o placa positivamente cargada (Op. cit. Buffer; Thorne, 1991).

Cualquier alimento o material que contenga iones es capaz de interactuar con cualquier campo eléctrico, incluyendo las microondas.

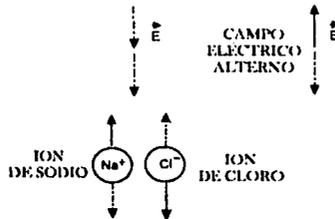


Fig.2.6.- Interacción iónica

#### 2.4.2.- Interacción dipolar

Las moléculas de agua que prevalecen en los alimentos y en otros materiales, están formados por dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno. Su estructura recuerda a la de una letra V, formando un ángulo de casi  $105^\circ$ . Los átomos de hidrógeno están

cargados parcialmente con una carga positiva, mientras que los átomos de oxígeno están cargados negativamente. De esta manera, las cargas están físicamente separadas y son llamados *dipolos*, o bien, la molécula es llamada *polar*. Este dipolo es equivalente a la aguja magnética de una brújula, y en un campo eléctrico actúa de la misma manera que esta en un campo magnético. Si estas moléculas de agua son colocadas en una región de un campo eléctrico oscilante, experimentarán una fuerza rotacional que las orienta en la dirección del campo eléctrico.

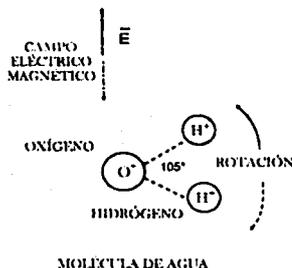


Fig.2.7.- Interacción dipolar

Antes de aplicar un campo eléctrico de microondas, todas las moléculas de agua en el alimento están agitadas térmicamente de forma aleatoria de acuerdo a la temperatura inicial de la muestra a calentar. Cuando el campo es aplicado, las moléculas tenderán a orientarse en la dirección inicial del campo, chocando aleatoriamente con moléculas vecinas. Cuando el campo cambia de dirección, ocurrirá exactamente lo mismo. Estas colisiones o choques incrementarán su agitación térmica, con la que se presentará un aumento en la temperatura. La energía es extraída del campo eléctrico por medio de los dipolos y es transferida a otras moléculas por medio de colisiones.

Las moléculas en forma sólida, como el hielo, se encuentran "encajonadas" por estructuras cristalinas y no pueden rotar lo suficiente como para colisionar con partículas vecinas. Por su parte, en una forma gaseosa, no existen suficientes moléculas vecinas como para garantizar colisiones y extraer energía.

En alimentos, la interacción de moléculas polares en un campo de microondas es el proceso principal de transferencia de energía.

Las microondas no son calor. Los campos de microondas son una forma de energía y son convertidas a calor a través de su interacción con partículas iónicas y polares cuya agitación es definida como calor (Op. cit. Thome).

## 2.5.- ENERGÍA, PODER Y CALENTAMIENTO

Los conceptos de poder y energía son a menudo confundidos cuando estos son referidos en términos de microondas, o bien, específicamente cuando se relacionan con calentamiento y cocción. Es por ello que precisar ambos conceptos se hace necesario.

Podemos entender a la energía, en términos simples, como la capacidad, ya sea de un ser vivo o de una máquina, de llevar a cabo un trabajo. Por otra parte, el poder lo podemos definir como la razón a la cual la energía es empleada o aprovechada al llevar a cabo un trabajo (Holdswort, 1992).

Anteriormente se ha descrito como es que el campo eléctrico producido a través de microondas en un horno interactúa con las moléculas de un alimento para producir calor y elevar la temperatura de dicho alimento. De acuerdo con las definiciones anteriores de energía y poder, los alimentos, como cualquier otro material, tenderán a absorber cierta cantidad de energía del medio circundante para que se lleven en su seno reacciones químicas. Al igual que en cualquier otro sistema, los alimentos nunca llegan a aprovechar en un 100% la energía disponible, por lo que ambas definiciones son ciertamente aplicables en estos complejos sistemas heterogéneos.

Una medida cuantitativa de la energía absorbida por la carga de un horno (en este caso un alimento), está determinada por tres factores, uno fijo, uno medible y uno determinado por la configuración propia del horno: frecuencia, factor de pérdida dieléctrica y campo eléctrico respectivamente (Op. cit. Buffer).

- Frecuencia (f). 2.450 GHz para hornos comerciales (aunque pueden llegar a emplearse ondas de 0.915 GHz)
- Factor de pérdida dieléctrica (e). Es un parámetro característico de la muestra del alimento que puede ser medido u obtenido de la literatura, que denota, por así decirlo, la aptitud del material para transformar en calor la energía electromagnética.
- Campo eléctrico (E) dentro del alimento. Determinado por la configuración del horno, propiedades dieléctricas y geometría.

Asimismo, matemáticamente, podemos definirlo como

$$P_v = 2 \pi f \epsilon_0 \epsilon'' E^2 \quad (5)$$

donde:

$P_v$  = energía absorbida (o poder) por unidad de volumen [ $W/m^3$ ];

f = frecuencia [Hz];

E = campo eléctrico dentro del alimento [v/m];

$\epsilon_0$  = permitividad dieléctrica real;

$\epsilon''$  = factor de pérdida dieléctrica.

Una vez que la energía ha sido absorbida por la muestra, el movimiento molecular produce un aumento de temperatura, el cual es determinado tanto por la energía absorbida como por las propiedades termofísicas del alimento.

$$P = P_v V \quad (6)$$

$$P = 14.7 \frac{V(m^3) \rho (Kg/m^3) C_p (J/KgK) \Delta T (K)}{t (s)} \quad (6a)$$

o bien,

$$P = 69.6 \frac{V \rho C_p \Delta T}{t} \quad (6b)$$

donde:

V = volumen total de la muestra;

$\rho$  = densidad de la muestra;

Cp = calor específico de la muestra;

t = tiempo en que las microondas son aplicadas;

P = razón a la que la energía está siendo absorbida [watts].

Las unidades empleadas en las ecuaciones (6a) y (6b) se indican en las mismas.

## 2.6.- FUNCIONAMIENTO DEL HORNO DE MICROONDAS

Los procesos de calentamiento y cocción de alimentos por medio de microondas son producto de investigaciones derivadas del desarrollo del radar (*radio detection and ranging*), durante la segunda guerra mundial. Durante este período, tubos al vacío llamados *magnetrones* fueron inventados y perfeccionados hasta ser capaces de producir ondas electromagnéticas a frecuencias nunca antes alcanzadas llamadas microondas que oscilaban entre 1 y 30 GHz. Actualmente se ha establecido que sólo las ondas con frecuencias de 300MHz (0.3GHz) a 300GHz pueden denominarse microondas (Satin, 1993).

La primera referencia documentada sobre la aplicación de las microondas en alimentos data de 1947, llevada a cabo por la Percy Spencer of Raytheon Corporation. Su invento consistía en un par de magnetrones, un fuente de poder que proveyera del voltaje suficiente para la operación de los mismos, un regulador de la energía generada, un cronómetro y una sección en donde se exponía al alimento a la acción de las microondas. En la actualidad, este es el concepto general que siguen todos los hornos de microondas, tanto domésticos como industriales (*idem*).

### 2.6.1.- El sistema de calentamiento

En la figura 2.8 se muestra una simplificación esquemática de un horno de microondas convencional, en donde se observa que la parte medular del mismo es el *magnetrón*, que genera las ondas electromagnéticas (microondas).

Los hornos de microondas están constituidos esencialmente por un generador (*magnetrón*), unos tubos de aluminio, denominados "guías" y una cámara. En el caso de las instalaciones industriales, en donde podemos encontrar procesos continuos, tenemos un túnel por el que discurre una cinta sin fin, los cuales, al igual que las cámaras en los procesos por lotes, deberán ser herméticos con el objeto de evitar fugas de microondas que podrían afectar a la salud del personal.

El *magnetrón* es un diodo cilíndrico en el que el ánodo se halla constituido por un anillo de cavidades resonantes y el cátodo (que va instalado dentro del ánodo), está formado por un cilindro metálico caliente que actúa como fuente de electrones. Cuando al conjunto se le aplica un elevado voltaje los electrones liberan energía, generada en forma de energía de microondas oscilando a una elevada frecuencia. Esta energía, es conducida hacia las guías de radiación mediante electroimanes. En el interior de las guías la energía se va reflejando siendo de esta forma conducida hasta la cámara de calentamiento. En las instalaciones discontinuas, con objeto de que la distribución de energía sea homogénea, se emplean, o bien antenas rotatorias, o una plataforma rotatoria en la que se halla el alimento. De esta manera se evita la existencia de zonas de "sombra" (zonas que no son alcanzadas por la radiación). En los túneles continuos, el alimento, que circula sobre una banda sin fin, es sometido a una fuente energética dirigida sobre el mismo. En estas instalaciones es importante que la potencia del *magnetrón* esté de acuerdo con el tamaño de la cámara de calentamiento. La potencia de las instalaciones industriales continuas oscila entre los 30-120 kW.

Como las microondas calientan selectivamente aquellas partes del alimento con mayor contenido de agua, este sistema de calentamiento de alimentos es lógicamente rápido, el daño térmico que esta radiación produce es mínimo y no provoca cambios de color, ya que el alimento apenas se calienta. Estas instalaciones son pequeñas,

compactas, de funcionamiento rápido y se controlan fácilmente de forma automática. Además, el riesgo de que el alimento pueda contaminarse con los productos resultantes de alguna combustión, no existe.

El magnetrón de un horno de microondas convencional requiere aproximadamente 400 volts para su operación, mientras que los hornos industriales requieren aproximadamente 700. La fuente de poder eleva el voltaje desde el valor inicial (el proveniente de la línea de alimentación), hasta el valor requerido por medio de un transformador. Además, debido a que el magnetrón opera con líneas de voltaje constante, un circuito de diodos y capacitores es incluido con el propósito de rectificar la línea de voltaje alterno de alimentación.

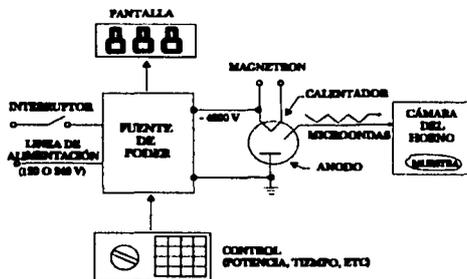


Fig.2.8.- Diagrama de un sistema de calentamiento por microondas

Dependiendo de la aplicación, la velocidad de calentamiento será controlada electrónicamente por el circuito de control además del cronómetro, el que regulará el tiempo durante el cual se llevará a cabo la aplicación. El registro del proceso será verificado por medio de la pantalla o "display". Actualmente, el empleo de microprocesadores permite un mayor control en tareas tales como cocción automática, descongelamiento-cocción, procesos de varias etapas, etc.

## 2.6.2.- Factores que afectan la velocidad de calentamiento

La velocidad de calentamiento, esto es, la energía absorbida por un alimento por medio de microondas, depende de algunos factores que serán descritos a continuación.

- El magnetrón.

El magnetrón es el dispositivo encargado de generar microondas dentro de un horno. Sus especificaciones y su fuente de poder determinarán la cantidad de energía "disponible" que puede ser descargada sobre un alimento.

Los imanes permanentes del magnetrón, cuando aumentan su temperatura, reducirán la capacidad o la magnitud del campo eléctrico que producen, lo que acarrea a su vez, una disminución en la potencia del magnetrón, por lo que es necesario un correcto sistema de enfriamiento, de lo contrario, se observarán caídas de hasta un 20% de la potencia en tan sólo 5 a 10 minutos de uso.

- Fuente de poder.

La fuente de poder puede tener una influencia de aproximadamente un 15% sobre la potencia "total" del horno, al igual que cualquier alteración en la capacidad del capacitor. El diseño del transformador, a su vez, será el factor responsable por cambios en la potencia con la línea de voltaje.

- Volumen y geometría del alimento.

La cantidad de energía absorbida por el alimento dependerá del volumen de éste con respecto al tamaño de la cavidad del horno. La cantidad de energía absorbida disminuye rápidamente conforme el tamaño de la muestra se reduce para un horno dado. De todos los parámetros relacionados con los alimentos, el volumen parece ser el que tiene un mayor efecto.

La razón  $r$ , definida como el poder absorbido por 500 ml de agua entre el absorbido por 1000 ml, es un buen indicador de cómo la energía absorbida decrece conforme cambia el volumen. Para hornos típicos,  $r > 0.8$ .

Por otro lado, la geometría parece ser un parámetro significativo, aunque no se haya establecido con precisión. Sin embargo, se ha planteado que más bien la superficie de contacto es el parámetro clave en la absorción de energía, aunque esta hipótesis tampoco haya sido corroborada (Op. cit. Bufferl).

- Temperatura del producto.

Las propiedades dieléctricas de un alimento y la cantidad de energía absorbida son, ambos, dependientes tanto de la temperatura, como de la composición del mismo. La velocidad de calentamiento de un alimento no salado, como por ejemplo una zanahoria, cuyas propiedades de absorción disminuyen con la temperatura, disminuye conforme éste es calentado. Por el contrario, un alimento salado como el jamón, incrementará su capacidad de absorción conforme aumente su temperatura, con lo que puede llegar al punto de carbonizarse.

- Características del horno

Parámetros tales como geometría de la cámara del horno y el sistema de alimentación de las microondas de la misma parecen no tener efectos significativos por sí mismos sobre la velocidad de calentamiento, sin embargo, en lo referente al tamaño de la cámara, parece existir cierto efecto cuando se refiere a éste en relación con el tamaño de la muestra a calentar, ya que cuando esta es relativamente grande, pareciera que la absorción de energía disminuye.

Por otro lado, el material con que está construida la cámara tendrá un efecto directo sobre la cantidad de energía absorbida por el alimento. Se ha establecido que una cámara construida con acero inoxidable favorecerá la absorción de unos 50 watts más con respecto una superficie de acero pintada.

La eficiencia de un horno de microondas convencional es de un 44%, lo que pudiera parecer sorprendentemente bajo, sin embargo, si consideramos la totalidad de los dispositivos que se requieren para el óptimo funcionamiento de un horno, encontraremos una gran cantidad de "fugas" de energía debido a componentes tales como ventiladores, lámparas, controles, magnetrón, transformador, fuente de poder, etc.

## 2.7.- EL COMPORTAMIENTO DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS CON LA MATERIA Y LAS PROPIEDADES DIELECTRICAS DE LOS ALIMENTOS

Debido a que las microondas son parte del espectro electromagnético, estas se comportan tal y como lo hace la radiación de luz visible. De igual manera, los materiales interactúan con las microondas en tres formas (Op. cit. Billmeyer):

- reflejan la radiación de microondas emitidas sobre ellos;
- absorben parte de la energía de las microondas que son transmitidos a través de ellos;
- transmiten microondas que entran en ellos.

### 2.7.1.- Reflexión

Para entender como es que las microondas interactúan con la materia examinemos un caso simple; una onda plana incidiendo sobre una placa infinita. Una onda plana es aquella radiación de microondas cuya dirección de campo eléctrico en el espacio es siempre paralela, tal como en el caso de las microondas en la cámara de un horno yendo de pared a pared. Por otra parte, el concepto de placa infinita podemos entenderlo como un cuerpo con geometría rectangular cuyo largo es de longitud considerablemente mayor respecto a su ancho y su espesor. Este tipo de simplificaciones nos permite estudiar un fenómeno de manera más uniforme, es decir, sin considerar los efectos que se presentan en bordes y esquinas.

De las radiaciones de microondas que inciden sobre una placa en dirección perpendicular a la superficie de esta, una fracción de energía es reflejada por la superficie  $P_r$ . La cantidad de la energía reflejada dependerá directamente de las propiedades dieléctricas del material ( $\epsilon''$ ). Los errores inducidos por el desprecio del

valor de  $\epsilon''$  son de aproximadamente 5% en casi todos los alimentos. Haciendo esta consideración, la fracción de microondas reflejada teóricamente por la superficie de un alimento en forma de placa infinita es

$$Pr = ((\epsilon'^{1/2} - 1) / (\epsilon'^{1/2} + 1))^2 \quad (7)$$

en donde  $\epsilon'^{1/2}$  es equivalente a el índice de refracción  $\eta$ .

### 2.7.2.- Absorción

Si la fracción de energía reflejada es  $Pr$ , la cantidad transmitida por el material estará dada por  $Po = 1 - Pr$ . Una vez que cierta cantidad de energía penetra al alimento, esta se propaga internamente en dirección perpendicular a la superficie hacia la cara opuesta de la placa. Si el material es "absorbedor de microondas", la energía propagante decrece conforme atraviesa la placa y más y más energía va siendo absorbida.

### 2.7.3.- Transmisión

La energía de una onda que es reflejada por una superficie consiste en la suma de la energía reflejada inicialmente (la energía reflejada una vez que ésta ha hecho contacto con la superficie), más toda la energía emanada por la superficie provenientes de las múltiples refracciones internas.

Adicionalmente, una cierta cantidad de energía "escapa" por el lado opuesto de la superficie durante esas múltiples refracciones. La cantidad total de energía transmitida a través de un cuerpo es la suma de la energía emanada a partir de cada refracción interna.

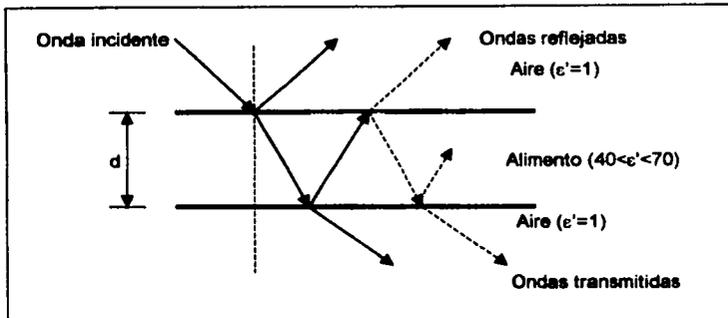


Fig.2.9.- Reflexión, Absorción y Transmisión de microondas en un medio dieléctrico

Las ecuaciones desarrolladas por Maxwell predicen el comportamiento de la radiación electromagnética con la materia para cualquier tipo de material y geometría. Para entenderlos, dos parámetros deberán ser descritos: permeabilidad ( $\mu$ ) y permitividad ( $\epsilon$ ).

$$\mu = \mu' - i\mu'' \quad (8)$$

en donde:

$\mu$  = permeabilidad magnética real o constante magnética real

$\mu'$  = permeabilidad magnética teórica (constante)

$\mu''$  = factor de pérdida magnética

$i = -1^{1/2}$  (número complejo)

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (9)$$

en donde:

$\epsilon$  = permitividad dieléctrica real o constante dieléctrica real

$\epsilon'$  = permitividad dieléctrica teórica (constante)

$\epsilon''$  = factor de pérdida dieléctrica

$i = -1^{1/2}$  (número complejo)

Debido a que la interacción magnética en alimentos es nula,  $\mu = 1$  y sólo se considerará a  $\epsilon$ . Sin embargo, cuando se implique el uso de estructuras magnéticas en el procesamiento de alimentos, la permeabilidad deberá considerarse, ya que pueden tener lugar excesivas pérdidas de energía.

El término de permitividad no es de uso común, por lo que se ha convenido emplear en su lugar el término de constante dieléctrica.

Cabe aclarar que respecto a los valores de cada uno de los componentes de la ecuación que define a la permitividad o constante dieléctrica, que estos siempre estarán reportados en la literatura como valores correspondientes a condiciones de vacío (Op. cit. Cheftel)

Los valores de  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  juegan un papel importante en la interacción de un campo eléctrico de microondas con un material.

#### 2.7.4.- Significado físico de $\epsilon$ , $\epsilon'$ y $\epsilon''$

La constante dieléctrica  $\epsilon'$  puede ser entendida como la capacidad de interacción de las moléculas de un alimento dentro de un campo eléctrico producido por microondas. Esta interacción "global" estará comprendida tanto por la interacción de las moléculas polares dentro del campo, como de la interacción de las partículas ionizadas en condiciones estándar de vacío, y deberán de ser medidas o consultadas directamente de la literatura (Op. cit. Buffer).

Es decir,  $\epsilon'$  nos indica "cuanto" se pueden mover, en su conjunto, todas las moléculas de un alimento bajo la influencia de un campo eléctrico bajo condiciones específicas teóricas. Sin embargo, deberemos considerar que  $\epsilon'$  variará

considerablemente bajo condiciones distintas a las que se evaluó originalmente. El término  $\epsilon''$  integrará, a su vez, a las modificaciones dieléctricas sufridas por un material bajo condiciones específicas. Dicho término considerará tanto a las modificaciones debidas a la interacción iónica y a la interacción polar, por tanto:

$$\epsilon''_T = \epsilon''_\sigma + \epsilon''_\delta \quad (10)$$

en donde:

$\epsilon''_T$  = factor de pérdida dieléctrica total

$\epsilon''_\sigma$  = factor de pérdida dieléctrica debida a la interacción iónica

$\epsilon''_\delta$  = factor de pérdida dieléctrica debida a la interacción polar

Es por ello que al restar  $\epsilon''$  a  $\epsilon'$  obtendremos un valor real de la constante dieléctrica definida por  $\epsilon$ .

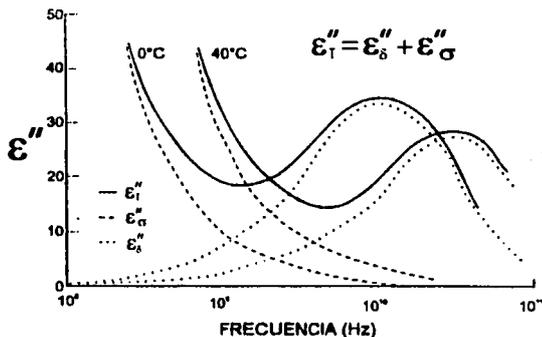


Fig.2.10.- Factor de pérdida dieléctrica vs frecuencia

En el caso de  $\epsilon''_o$  (factor de pérdida dieléctrica iónica), observamos que a medida que la frecuencia (f) disminuye,  $\epsilon''_o$  aumenta. Esto se puede entender de la siguiente manera.

En un campo dieléctrico producido por una corriente directa (DC), en donde  $f=0$ , los iones se mueven continuamente, es decir, en una sola dirección. La clave está en que la energía absorbida por los iones en movimiento no se incrementa ilimitadamente conforme la frecuencia disminuye.

La razón por la cual  $\epsilon''_o = 0$  cuando  $f=0$  puede deberse al hecho de que bajo esta condición ( $f=0$ ), los iones no "vibran" lo suficiente como para colisionar con sus partículas vecinas y transmitirles así calor, con lo que la capacidad del material de calentarse se verá seriamente disminuido en forma global, es decir, tendrá una mayor resistencia al calentamiento o absorción de energía dado el poco "potencial de movimiento" de las partículas iónicas que la conforman. Por otro lado, conforme aumenta la frecuencia del campo eléctrico, los iones se moverán mucho más, chocando en todo momento con sus partículas vecinas, transmitiéndoles así una mayor cantidad de calor por unidad de tiempo y volumen (de la muestra), con lo que se tendrá una mayor optimización de la energía y una consiguiente baja en el valor de  $\epsilon''_o$ , es decir, una menor resistencia al calentamiento.

En el caso de  $\epsilon''_s$ , debida a las moléculas polares, estas se alinean al campo eléctrico en virtud de su momento dipolar. Es por ello que cuando  $f=0$ , estas moléculas se orientarán y alinearán en la dirección del campo, pero no girarán dado que el campo eléctrico no se alterna, con lo que no colisionarán con moléculas vecinas y por tanto  $\epsilon''_s=0$ , es decir, no habrá transferencia de energía y/o calor. Conforme la frecuencia aumenta, las moléculas interactuarán con el campo eléctrico y rotarán cada vez más rápido, con lo que comenzarán a transferir energía y/o calor al chocar con sus moléculas vecinas. Sin embargo, llegará el momento, a cierta frecuencia, a la que  $\epsilon''_s$  alcanzará un valor máximo (llamado frecuencia crítica  $f_c$ ), seguido del cual, decrecerá el valor de  $\epsilon''_s$ .

A frecuencias muy bajas, el dipolo "sigue" al campo eléctrico libremente y solo un poco de energía es transferida a las moléculas circundantes, con lo que hay muy poca absorción de energía. Conforme la frecuencia aumenta, el impedimento molecular se incrementa y más y más energía es transferida a las moléculas vecinas. Un máximo en el valor de la absorción de energía es alcanzado y conforme se eleva el valor de  $f$ , el dipolo no puede moverse mucho debido a la rapidez con que el campo está oscilando. El dipolo, en esta situación, no puede transferir energía y la absorción de esta decrece hasta cero.

A bajas frecuencias,  $\epsilon''_s$  es menor dado que existe una mayor transferencia de energía debido a que las moléculas polares interactúan entre sí por medio de fuerzas del tipo de Van der Waals, enlaces de hidrógeno, etc, con lo que hay una mayor "cercanía" entre las moléculas. A frecuencias más altas, dada la rapidez con que el campo oscila, las moléculas reducen su movimiento, con lo que la transferencia de energía es mínima, mientras que el valor de  $\epsilon''_s$  aumenta. Dicho comportamiento es representado en la siguiente gráfica.

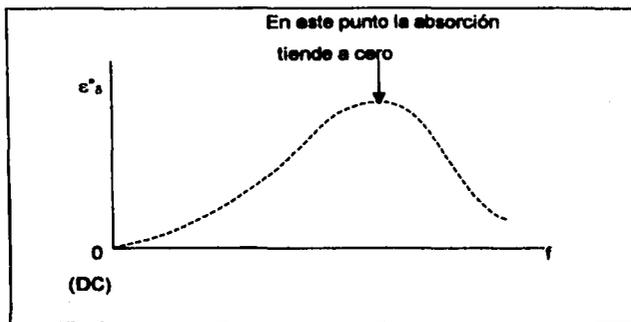


Fig.2.11.-  $\epsilon''_s$  vs Frecuencia

Las propiedades dieléctricas de cada uno de los componentes de un alimento deberán de considerarse de acuerdo a su fracción volumétrica y posteriormente se deberán "sumar" para conformar un parámetro dieléctrico "total" del sistema, es decir, la contribución de cada uno de los componentes de un alimento deberá ser tomada en cuenta si se quiere establecer el modelo que siga el mismo dentro de un campo de microondas. Tal y como se ha mencionado anteriormente, el factor total de pérdida dieléctrica es la suma de las contribuciones de pérdida dieléctrica iónica y polar.

En alimentos con bajo contenido de sal, esto es, en donde la absorción de energía se debe principalmente al efecto del campo electromagnético de las microondas sobre las moléculas polares, se observa que, a una misma frecuencia, existe una clara disminución en el valor del factor de pérdida dieléctrica total  $\epsilon''$  conforme aumenta su temperatura, es decir, aumenta la resistencia al calentamiento al aumentar el valor de la constante dieléctrica real  $\epsilon'$ , de acuerdo con la relación matemática

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (11)$$

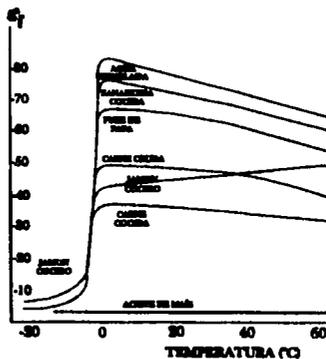


Fig.2.12.- Constantes dieléctricas de alimentos vs Temperatura (Ref. Buffer, 1992)

En el caso de alimentos con un alto contenido de sal, como el jamón, en donde la acción iónica tiene una influencia dominante sobre la acción polar, se observa el efecto contrario. A una misma frecuencia, el valor de  $\epsilon''$  disminuye, con lo que el valor de  $\epsilon'$  aumentará conforme se eleva la temperatura.

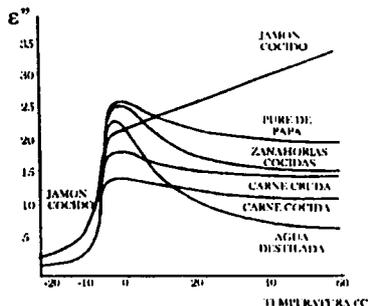


Fig.2.13.- Factor de pérdida dieléctrica en alimentos vs Temperatura (Ref. Buffer, 1992)

#### 2.7.5.- Profundidad de penetración

Las microondas, tal y como se ha discutido párrafos arriba, al formar parte del espectro electromagnético, cumplen con las propiedades características de reflexión, absorción y transmisión de las ondas electromagnéticas. Sin embargo, será necesario definir, además, un parámetro que indique cuánto penetran las microondas en un material antes de que estas se vean reducidas hasta cierta fracción de su valor inicial. Este parámetro, definido como *profundidad de penetración*, estará definido por las propiedades dieléctricas  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$  de un material dado.

El entendimiento de este fenómeno puede conducir a un mejor aprovechamiento del calor producido, aumentando así la efectividad de un proceso.

En la literatura suelen encontrarse diferentes definiciones del concepto de profundidad de penetración, los cuales, básicamente difieren en la fracción del valor

original que las microondas deberán alcanzar al penetrar en un material dado, con lo que la profundidad quedará definida por la distancia a la que las microondas alcanzarán dicha fracción.

La definición más fácilmente conceptualizada es la que denota a la profundidad de penetración como la distancia a la que las microondas alcanzan la mitad de la energía original con que fueron emitidas. Esta relación está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{P(z)}{P_0} = e^{-z/dp} \quad (12)$$

en donde:

$P(z)/P_0$  = fracción de energía dentro del material al que deberán llegar las microondas;

$e$  = logaritmo neperiano (constante matemática = 2.781);

$z$  = distancia;

$dp$  = profundidad de penetración.

Las unidades de distancia y profundidad de penetración son arbitrarias, debido a la forma en que se relacionan, sin embargo, las unidades más ampliamente empleadas son los centímetros.

La profundidad de penetración de un material dependerá enormemente de  $\epsilon'$  y  $\epsilon''$ , y aunque numerosas relaciones matemáticas han sido empleadas, la ecuación que goza de una mayor exactitud es

$$dp = \frac{\lambda_0 \sqrt{2}}{2\pi} \left\{ \epsilon' \left[ \left( 1 + (\epsilon''/\epsilon')^2 \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{-1/2} \quad (13)$$

Para 2450 MHz,  $\lambda_0 \sqrt{2}/2\pi = 1.085$  in (2.76 cm); para 915 MHz, el valor corresponde a 2.91 in (7.38 cm).

Para valores relativamente bajos de  $\epsilon''$ , la ecuación anterior se simplifica drásticamente de la siguiente manera:

$$dp = D(P/\epsilon) = \frac{\lambda_0 \epsilon''^{1/2}}{2\pi \epsilon''} \quad (14)$$

Aunque esta aproximación es válida para materiales con bajos valores de  $\epsilon''$ , tales como grasas y aceites ( $\epsilon'' \ll 1$ ), puede ser empleada para muchos otros alimentos.

De una forma general, las microondas presentan la ventaja de penetrar bastante profundamente en los alimentos y de forma prácticamente instantánea. El aumento de la temperatura por unidad de tiempo se expresa en °C/min, y viene dado por la relación

$$\Delta T = 14.4 P_v / C_p \quad (15)$$

en donde:

$P_v$  = el valor que se obtiene de la ecuación (5), descrita párrafos arriba [watt/cm];

$C_p$  = calor específico del alimento [cal/g].

Conviene señalar que la relación entre frecuencia y penetración no se cumple para todos los alimentos. Por ejemplo, los perfiles de temperatura en asado de res son prácticamente idénticos cuando son sometidos a frecuencias de 915 y 2450 MHz. (Op. cit. Buffler; Urbain, 1986)

## 2.8.- APLICACIONES DE LAS MICROONDAS EN ALIMENTOS

Si consideramos que la cantidad de calorías aportada a un alimento por medio de radiaciones de hiperfrecuencia tiene un costo de 10 a 20 veces más el costo de las transferidas al mismo a través de vapor y de 2 a 5 veces más que las que se obtienen por calentamiento eléctrico, los aspectos económicos adquieren una gran relevancia en

el empleo de las microondas a nivel industrial. La problemática radica principalmente en el costeo y los problemas que plantea la concepción y empleo de generadores de ondas de hiperfrecuencia. Los tubos electrónicos especiales que producen las ondas solo alcanzan entre 1000 y 2000 horas de servicio, por lo que los dispositivos deben estar calculados de modo tal que la mayor parte de la energía electromagnética suministrada sea absorbida efectiva y homogéneamente por parte del producto tratado (Op. cit. Chetel).

Es por ello que los sistemas industriales que emplean microondas en sus procesos suelen ser procedimientos mixtos en los que también intervienen otros medios de calentamiento.

Uno de los usos más importantes que han encontrado las microondas en la industria alimenticia, es en el secado de las papas fritas. Estas, una vez fritas, tienen un contenido de humedad que oscila entre el 5 y el 7 %, el cual debe ser reducido hasta un 2% si se desea que el producto sea estable a las condiciones de almacenamiento (Op. cit. Potter).

Debido a la presencia de azúcares reductores, el secado por aire caliente de las papas fritas trae como consecuencia un intenso e indeseable pardeamiento no enzimático. El secado por microondas durante unos 30 segundos, complementado por una corriente de aire menos intensa, permite limitar el oscurecimiento. Este procedimiento permite rendimientos de 300 Kg por hora, en donde la temperatura no sobrepasa los 100°C.

El calentamiento por microondas presenta además otras ventajas cuando se emplean para el secado de un producto. En efecto, teniendo en cuenta que la energía se absorbe preferentemente por las zonas donde la humedad residual del producto es más elevada, las microondas pueden emplearse al final del secado, por ejemplo, de galletas, para hacer más homogénea la repartición de agua en toda la masa del producto. Las microondas también permiten transformar en vapor el agua de las zonas profundas sin sobrecalentar las zonas externas ni provocar migraciones de solutos al interior, obteniéndose así productos muy porosos sin cortezas que impidan una

adecuada rehidratación. Este procedimiento se utiliza para el secado de pastas alimenticias destinadas a comercializarse como sopas instantáneas.

Las microondas también se pueden aprovechar para reducir el tiempo de liofilización, dado que las microondas atraviesan fácilmente, sin producir recalentamiento, la capa seca exterior que, como se sabe, opone durante la liofilización una resistencia acusada a la transferencia de calor por conducción, por lo que es al final de la liofilización donde las microondas despiertan un mayor interés. Sin embargo, la principal dificultad reside en las descargas eléctricas que se producen bajo vacío y que, al mismo tiempo constituyen una pérdida de energía.

La cocción, tal y como se lleva a cabo de forma convencional, consiste en calentar la superficie, pues depende de la transferencia de calor por conducción que el producto alcance la temperatura deseada en el centro, por lo que el gradiente de temperatura imperante en estos procesos, hace que la cocción homogénea sea difícil de alcanzar. Los procesos continuos de cocción en los que se ha implementado el uso de microondas en pasteles de carne, tocino y piezas de pollo, han dado como resultado la obtención de productos correctamente cocidos cualquiera que sea su tamaño, además de resultar rentables dada la economía de la reducida mano de obra necesaria para su manejo.

La pasteurización y la esterilización son procesos en los que también se ha sugerido el empleo de microondas, ya que estas atraviesan perfectamente materias plásticas y vidrio (aunque no metales). Algunos problemas, tales como la medición y regulación de la temperatura aún no están perfectamente resueltos, además de que el proceso significa elevados costos. Sin embargo, estos procedimientos presentan la ventaja de permitir la aplicación de tratamientos de alta temperatura y tiempos cortos a productos para los que es imposible la transferencia de calor por convección, con lo que debe originarse una notable mejoría en la calidad del producto final.

El interés del uso de las microondas para la descongelación de alimentos reside en la rapidez de calentamiento y en la supresión del período, algunas veces largo,

durante el cual el alimento está a una temperatura desfavorable en donde corre el grave riesgo de una contaminación bacteriana.

La dificultad más grave proviene del hecho de que el coeficiente de pérdida dieléctrica del agua es mucho más elevado que el del hielo, por lo que existe el riesgo latente de que algunas zonas, ya descongeladas, puedan alcanzar temperaturas elevadas antes de que la descongelación sea completa. Se ha sugerido la necesidad de períodos intermedios de descanso con la finalidad de permitir el equilibrio de temperaturas. Para el descongelamiento de alimentos precocidos congelados se aconseja emplear el recalentamiento por microondas sólo por encima de 0°C.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## CAPITULO TRES

### ALIMENTOS, PROPIEDADES MECÁNICAS Y TEXTURA

#### 3.1.- GENERALIDADES

Como consumidores, todos nos damos cuenta con precisión de la textura de un alimento, ya sea sólido o líquido, y no puede dudarse que la textura es un factor importante en la calidad del alimento. En el proceso de masticación, las fuerzas a las que se somete un alimento son complejas. El masticado rompe a éste y lo hace más digerible. Durante este proceso se transmite información desde varios receptores sensoriales de la boca a partes específicas del cerebro, donde se integra con otras informaciones recibidas así como con los datos almacenados en la memoria para dar una impresión general de la textura del alimento en cuestión; si esto no está de acuerdo con lo que esperaríamos de un alimento particular, podemos quedar decepcionados de su calidad. Por ejemplo, podemos esperar que nuestro filete sea tierno y jugoso, y no pesado ni fibroso; las manzanas deberían de ser crujientes, firmes y jugosas, y no tiesas, blandas o secas; los helados deberían ser suaves y cremosos y no congelados y arenosos. Preferimos que nuestras galletas sean crujientes en vez de blandas, y nos gusta que nuestro pan sea blando y suave o quizá denso y con corteza. Nos gusta que nuestra margarina se extienda fácilmente, por citar tan sólo unos ejemplos (Op. cit. Lewis).

La textura de los alimentos está relacionada con propiedades físicas y químicas percibidas, por vía ocular antes del consumo, por el sentido del tacto al manejar el alimento, por distintos receptores sensoriales de la boca durante el consumo y por el sentido auditivo. De este modo, el consumidor se da cuenta de todo un conjunto de características texturales que se derivan de distintas propiedades fisicoquímicas del alimento tales como el tamaño y forma generales, tamaño de partícula, contenido en grasa, estructura y propiedades mecánicas. Ha habido muchos intentos de definir con precisión la textura, sin embargo, una definición generalmente aceptada es que la

textura es la conjunción de atributos de un producto alimenticio que resulta de una combinación de propiedades físicas y químicas, percibidas mediante los sentidos.

Al tratar de evaluar la textura de un alimento, salta a la vista que, por lo general, ésta siempre estará definida en función de más de un parámetro o propiedad mecánica, como producto de la complejidad estructural que posee. El abordar un problema relacionado con la estructura de un alimento, generalmente nos conlleva a simplificar al mismo, especialmente desde un punto de vista mecánico. Esto se debe, en parte, a que un alimento, en su forma original y a diferencia de un material ordinario, desempeña más funciones que simplemente proporcionar un soporte, por ejemplo, y en parte a que los detalles de su estructura son complejos. Pero antes de abordar el tema referente a la evaluación de la textura, revisemos brevemente algunos conceptos relacionados con la mecánica de materiales. Para ello, y a riesgo de simplificar demasiado, tomaremos algunos ejemplos muy simples con este fin.

### 3.2.- ALGUNAS REFLEXIONES SOBRE MATERIALES

Imaginemos que tenemos dos ladrillos y una sólida tabla de madera. Podremos utilizar la tabla como una viga simplemente colocando debajo de cada uno de sus extremos un ladrillo. Si ahora nos ponemos de pie en el centro de la viga, la tabla se doblará bajo nuestro peso. La superficie inferior se comba y expande, mientras que la superficie superior se curva en sentido opuesto y las fibras de la madera se "aprietan", es decir, la parte superior de la viga sufre una *compresión*, mientras que la superficie inferior se somete bajo *tensión*.

Si midiéramos la fuerza que actúa sobre la madera, a diferentes niveles, encontraríamos que la fuerza de compresión será más alta en la superficie superior y disminuirá a medida que nos alejemos de dicho punto. De manera análoga, la fuerza de tensión será más alta en la superficie inferior y más baja hacia el interior. En el centro de la madera puede haber un punto donde no haya ninguna presión. A este punto se le conoce como eje neutro de la viga. Pero no solo cambia la magnitud de la fuerza transversalmente, sino también en sentido longitudinal a una misma "profundidad", ya

que las fuerzas de compresión y de tensión son más grandes en el centro de la tabla, donde la curvatura es mayor, mientras que hacia los extremos decrecen.

Aunque el sistema descrito sirve perfectamente como viga, en la forma en que se construyó no es muy útil si tuviera que soportar un peso muy grande, ya que, incluso, podría llegar a romperse. Una solución simple para ello es girar la tabla sobre su canto y de esta manera probablemente la tabla no se doblaría visiblemente en absoluto. Si midiéramos nuevamente las fuerzas de tensión y compresión, encontraríamos que serían mucho menores que antes, y dado que el centro de la viga no está bajo presión, podríamos taladrar agujeros en él y apenas disminuiría su resistencia. En realidad, este es el principio de funcionamiento de las vigas de acero en doble T empleadas en construcción.

Pensemos ahora en un material diferente. Tomemos por ejemplo una costilla de res. Si la sujetamos fuertemente con ambas manos y tratamos de romperla notaremos que esta tarea no es precisamente muy fácil. Una característica que notamos al realizar este simple experimento es que la costilla es flexible y resistente, es decir es una estructura elástica. En términos de ingeniería, un material elástico es aquel que retorna a su forma original cuando una fuerza deja de ser aplicada, sin sufrir ninguna deformación permanente, es decir una modificación irreversible en sus dimensiones. Además de ser elástico, el hueso también es rígido. Los materiales rígidos son aquellos que requieren de un esfuerzo considerable para provocar una pequeña deformación.

La rigidez de un material se expresa en función de un parámetro llamado *módulo de Young* (en memoria del físico Inglés Thomas Young), y está definido simplemente como la fuerza o esfuerzo aplicado a un material dividida entre la deformación producida por ésta. La aplicación de una fuerza de baja magnitud sobre una liga, por ejemplo, producirá un gran cambio en su longitud, teniendo un bajo módulo de Young. Por el contrario, a un alambre de acero deberá aplicársele una fuerza de gran magnitud para ocasionar una deformación muy pequeña; el acero tiene un alto módulo de Young.

El módulo de Young  $E$ , es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en su región elástica (Fig. 3.1). Esta relación también es conocida como la *Ley de Hooke*, la que establece la relación de proporcionalidad entre un esfuerzo moderado aplicado a un material y la deformación debida a dicho esfuerzo. Sin embargo, Hooke no notó que tal proporcionalidad es también dependiente de la geometría de la muestra. Fue hasta el año 1800 que Thomas Young demostró que, describiendo esta relación en términos de esfuerzo y deformación, la dependencia de la geometría podría ser despreciada (Rhosental, 1999).

Los materiales elásticos se comportan elásticamente sólo si la fuerza que se les aplica está por debajo de un nivel crítico. Si la fuerza excede ese umbral, denominado *límite elástico* o *esfuerzo de cedencia*, entonces el material quedará deformado permanentemente. Cuando un material está siendo permanentemente forzado se dice que es *plástico*. La relación entre la conducta elástica y plástica puede demostrarse fácilmente con una bolsa de plástico convencional, preferentemente grabada con alguna escritura. Si sujetamos la bolsa con ambas manos y ejercemos una fuerza pequeña, la bolsa se estirará y si no sobrepasamos el límite elástico del material, la bolsa volverá a su forma original al relajar la fuerza. Si tiráramos de la bolsa nuevamente, pero ahora con mayor fuerza, excederemos el límite elástico del material y al relajar la fuerza notaremos que la bolsa ha quedado permanentemente deformada; ha perdido su forma y las letras de la escritura están distorsionadas. El grado de deformación que puede soportar un material sin romperse estará dado por su *ductilidad*. La ductilidad es importante tanto para los diseñadores como para los fabricantes. El diseñador de un componente preferirá un material con cierta ductilidad, de manera que si el esfuerzo aplicado resulta demasiado alto, el componente se deforme antes de romperse. Los fabricantes también prefieren un material dúctil, a fin de manufacturar formas complicadas sin que se rompa durante el proceso.

No todos los materiales atraviesan una fase plástica antes de romperse. Algunos, como el vidrio y los materiales cerámicos, no pueden cambiar de forma y se describen como materiales *frágiles*. Caso contrario es el de los materiales *resistentes*, sobre los que es necesario aplicar una fuerza de gran magnitud para poder romperlos.

Algunas de las propiedades mecánicas descritas anteriormente pueden ser ubicadas dentro de una gráfica esfuerzo-deformación, tal y como se muestra en la siguiente figura:



Fig. 3.1.- Gráfica Esfuerzo vs. Deformación  
(Ref. Rosenthal, 1999)

### 3.3.- ALGUNAS REFLEXIONES SOBRE LA EVALUACIÓN DE TEXTURA

La textura de un alimento está gobernada por una combinación de propiedades mecánicas, así como por la modificación de estas durante el proceso de masticación en la boca, por lo que es casi imposible medir la textura, como tal, en un instrumento, aunque es posible identificar a los factores más importantes que la conforman y medirlas instrumentalmente (Rosenthal, 1999).

Existen dos métodos principales en la evaluación de la textura de un alimento. El primero de ellos, más común e intrínsecamente más sencillo, consiste en aplicar cualquier tipo de deformación mecánica a una muestra, medir su respuesta e intentar correlacionar los resultados con los obtenidos, a su vez, de una evaluación sensorial. El segundo método consiste en determinar que tipo de deformación mecánica describe mejor su comportamiento al ser sometido a un esfuerzo.

La evaluación sensorial de la textura de un alimento dependerá en todos los casos, como ya se ha mencionado, de las propiedades específicas del material, su estructura celular, fibras, poros, y su interacción en el proceso de masticación, el cual implica una serie de deformaciones dentro de la boca –morder, masticar, deglutir- e interacciones entre lengua, parte interna de las mejillas, labios y dientes, además de sabores, olores, sonidos y vistas, lo que implica complejos perfiles de movimiento y de aplicación de fuerzas. Como resultado de estas deformaciones en la boca, el alimento responderá a los esfuerzos inducidos de diferente manera de acuerdo a su tamaño y forma, las velocidades de masticación, de mordida, y su orientación. Las pruebas aplicadas a materiales, por su parte, intentan medir ya sea la fuerza requerida para producir alguna deformación dada o bien una propiedad determinada, de manera controlada, tales como aplastamiento (compresión), doblamiento o jaloneo (tensión), y mostrarías como independientes del tamaño, forma y geometría de la muestra, así como del método de prueba. Una pequeña muestra es deformada de manera controlada (normalmente por medio de un instrumento motorizado), midiendo tanto la fuerza que le es aplicada, como su consecuente desplazamiento y ambos parámetros son mostrados en una gráfica a partir de la cual podemos obtener datos tales como esfuerzo (fuerza/área) y deformación (desplazamiento/dimensiones originales), lo que nos permite prescindir de el tamaño de la muestra como una variable más (Askeland, 1998). Como consecuencia de ello, los datos obtenidos a partir una pequeña pieza de acero, teóricamente podrían ser escalados a una viga y de esta a un puente, dado que conoceríamos sus parámetros estructurales. No hay alguna razón que nos haga pensar que en el caso de los alimentos esto podría ser diferente, ya que estos no obedecen a diferentes leyes físicas que los otros materiales. No hay que perder de vista, sin embargo, que la gran mayoría de estas pruebas fueron originalmente concebidas para evaluar las propiedades de materiales normalmente empleados en construcción, tales como el acero y el concreto, y que los alimentos, siendo materiales biológicos, se comportan de manera diferente a dichos materiales ingenieriles, ya que fluyen y cambian dramática y permanentemente su forma al aplicárseles una fuerza; algo que no está permitido por los ingenieros (*idem*).

### 3.4.- EVALUACIÓN DE LA TEXTURA

De entre todos los instrumentos empleados para la evaluación de la textura, los instrumentos medidores de fuerza son los más comunes. Las pruebas que a través de ellos es posible realizar se clasifican de la siguiente manera (Bourne, 1982):

- Pruebas puntuales
- Pruebas de compresión-extrusión
- Pruebas de cizalla
- Pruebas de tensión
- Pruebas de torque
- Pruebas de dobléz y ruptura

En el presente trabajo, para la evaluación de la dureza de los especímenes estudiados, se recurrió al uso de pruebas puntuales, por lo que son el único tipo de pruebas que se describen a continuación.

#### 3.4.1- Pruebas puntuales

Las pruebas puntuales evalúan la fuerza requerida para que una sonda (o geometría con que se lleve a cabo la prueba) penetre o fracture un material. Este tipo de pruebas se caracteriza por contar con los siguientes elementos:

- un instrumento medidor de fuerza;
- penetración de una sonda o geometría en el material (alimento), causando una ruptura o flujo irreversibles;
- una profundidad de penetración que generalmente se mantiene constante a lo largo de todo el análisis.

De entre los métodos objetivos de evaluación de textura, este tipo de pruebas es una de las más simples y, al mismo tiempo, uno de los análisis más ampliamente usados.

Cuando un instrumento medidor de textura realiza algún tipo de análisis y automáticamente describe curvas de fuerza-distancia o de fuerza-tiempo, como en un Instron, por ejemplo, pueden obtenerse curvas de variados tipos. En una primera etapa, dichos gráficos muestran la deformación que un material está sufriendo conforme aumenta la fuerza aplicada. Esta etapa termina abruptamente cuando la punta comienza a penetrar en el alimento o material de prueba, el cual es representado por un abrupto cambio en la pendiente, llamado *punto de cedencia*. La etapa inicial de deformación no siempre tiene algún interés en este tipo de pruebas. El punto de cedencia indica el instante en que la punta comienza a penetrar en el alimento, causando una ruptura irreversible o un flujo, siendo este el punto de mayor interés en el análisis. La máxima fuerza alcanzada durante la prueba es interpretada como la dureza de un material. Mientras más grande es el esfuerzo, más duro es el material.

En la tercera fase de una prueba puntual, es decir, el momento en que se presenta un cambio en la dirección de la fuerza después de haber alcanzado el punto de cedencia y durante la penetración de la sonda de prueba en el alimento, se determinará el tipo de curva obtenida en función de si la fuerza se incrementa, se mantiene constante o disminuye una vez alcanzado el punto de cedencia. De igual manera, los resultados de una prueba puntual son expresados en una gráfica esfuerzo-deformación.

## CAPITULO CUATRO

### COLOR

Para describir el color, deberemos primero hacer referencia a dos fenómenos físicos: la producción de un estímulo a partir de la luz y la interpretación de este en el ojo y el cerebro. Debido a que el color solo existe en la mente del observador, los efectos en este son los de mayor importancia. Para un mejor entendimiento de ello, consideremos en primer lugar los aspectos físicos del color, los cuales son muy simples.

Desde el punto de vista puramente físico, la producción de color requiere de tres requisitos: una fuente de luz, un objeto iluminado por esta, y un receptor que perciba el color (ojo y cerebro). Alternativamente, este sistema (ojo-cerebro) puede ser reemplazado por un detector fotosensible (Billmeyer, 1981), (Badui, 1999).

#### 4.1.- FUENTES DE LUZ

La luz visible es una fuente de energía, parte de una familia que incluye ondas de radio, rayos X, rayos UV, infrarrojos y microondas entre otros, y puede ser descrita en términos de su *longitud de onda*, para la cual el *nanómetro* (nm) es empleado como unidad de longitud. La relativa insensibilidad del ojo humano limita la parte visible del espectro electromagnético a una estrecha banda de longitudes de onda que oscila entre los 380 y 750 nm. La gama de color que reconocemos como azul radica por debajo de los 480 nm; el verde oscila entre los 480 y los 560; el amarillo, entre los 560 y los 590; el anaranjado entre los 590 y los 630, mientras que por su parte, los tonos rojos poseen longitudes de onda mayores a los 630 nm. El púrpura, que es producido por una combinación de rojo y azul, es el único tono común que no se encuentra en el espectro.

Muchos de los objetos considerados como fuentes de luz emiten luz blanca o casi blanca —el sol, metales calientes como el filamento de tungsteno de las lámparas incandescentes, bulbos, lámparas fluorescentes, etc. La luz proveniente de cada fuente puede ser descrita en términos de *cantidad de luz* emitida a una longitud de onda dada.

Muchas fuentes de iluminación estándar han sido definidos por la Comisión Internacional de Iluminación (Commission International de l'Éclairage, o CIE por sus siglas en francés), para su uso en la descripción del color. Una de esas fuentes, la fuente A del CIE, es una lámpara de filamento de tungsteno operando a una temperatura de 2854 K. Las fuentes B y C del CIE surgen en realidad a partir de la fuente A, haciendo pasar esta a través de filtros líquidos. La fuente B, con una temperatura de color aproximada de 4800 K, es una aproximación de la luz de mediodía, mientras que la fuente C, de aproximadamente 6500 K, es una aproximación a la luz de día promedio (Clydesdale, 1975).

#### 4.2.- DETECCIÓN DE LUZ Y COLOR

Por mucho, el sistema más importante en la detección del color es el compuesto por el ojo, el sistema nervioso y el cerebro. Aunque no comprendemos del todo como es que trabaja, lo cierto es que todos los sistemas de detección de color han intentado duplicar los resultados de este sistema de una forma u otra. Afortunadamente, para los fines que perseguimos no nos es necesario tener una concepción completa de cómo es que la dupla ojo-cerebro detectan el color. Será suficiente mencionar que el ojo actúa como una especie de cámara, formando la imagen de un objeto en la retina, sensible a la luz, en donde se encuentran unos receptores sensibles a diferentes longitudes de onda, lo que permite al ojo "sentir" el color, una vez que todos estos sensores mezclan y envían sus respuestas al cerebro y son interpretadas por éste.

#### 4.3.- DESCRIPCIÓN DEL COLOR

Dejemos ahora los detalles de la fisiología, aunque sin perder de vista el sistema fuente-objeto-observador, y centrémonos en la descripción del color tal y como un observador con visión normal ve a éste a la luz de día.

La descripción ordenada y la especificación del color es una parte esencial en la resolución de problemas relativos al mismo. Lenguajes universalmente aceptados son necesarios a fin de poder referirnos a una muestra en ausencia de ésta, a través del

tiempo y del espacio, por lo que se requiere, además, de diferentes términos para describir todos los aspectos del color.

#### 4.4.- EL SISTEMA CIE

Este sistema se basa en el principio de que el estímulo para percibir un color debe partir de la combinación objeto-luz-observador. En 1931 la CIE introdujo los elementos *fuentes de luz y observador*, así como la metodología para determinar numéricamente una medida del color visto bajo una fuente de luz estándar por un observador estándar. Las fuentes de luz recomendadas son, como ya se ha mencionado, las fuentes A, B y C, pero 34 años más tarde, la CIE recomienda el uso de una serie de *iluminantes* (fuente cuya cantidad de luz ha sido definida a una longitud de onda dada), los cuales suplementan a las fuentes a partir de un estudio definitivo de la distribución espectral de energía de la luz de día.

Estos iluminantes abarcan longitudes de onda que van desde los 300 a los 830 nm, es decir, el rango espectral de la luz de día y comprenden rangos de temperatura de color de entre 4000 a 25,000 K.

Asimismo, la CIE ha recomendado el uso de un observador estándar, cuya visión de color sea representativa de la que la población humana tenga en promedio. Las implicaciones matemáticas que rigen el principio de un observador estándar son sumamente complejas, por lo que no nos detendremos en estos detalles y sólo consideraremos una descripción simple del mismo.

El principio del observador estándar se basa en un viejo experimento llevado a cabo por Newton en 1730 y retomado, años más tarde, por Grassmann en 1853. el experimento consiste en una lámpara de prueba de luz blanca, cuya luz incide en un punto de una pantalla blanca, al mismo tiempo que la luz de otras tres lámparas de color (verde, azul y rojo), inciden, al mismo tiempo, en un mismo punto, por encima del punto en que incide la luz de la lámpara de luz blanca en la pantalla. La intensidad de estas tres luces *primarias* debe ser cuidadosa y estrechamente controlada, con el propósito de que un observador pueda igualar el color de la luz de la lámpara de

prueba. Las cantidades de luz de éstas tres luces primarias que se obtienen tras la prueba, a partir de la longitud de onda final de cada color, son tres números que describen el color obtenido y reciben el nombre de *valores triestímulo* de ese color, y son representadas por las letras  $x$ ,  $y$  y  $z$ .

Una vez obtenidos los valores de  $x$ ,  $y$  y  $z$  a distintas longitudes de onda se deberá disponer tanto de los datos de cantidad de luz del iluminante  $P$  (a partir de su distribución espectral de energía), como de la reflectancia del objeto  $R$ , a las mismas longitudes de onda ( $\lambda$ ) a las que se obtuvieron  $x$ ,  $y$  y  $z$ . Se deberá obtener el producto  $PR$ , para cada longitud de onda y posteriormente, se deberá multiplicar por cada uno de los valores de  $x$ ,  $y$  y  $z$ , siempre a la longitud de onda correspondiente. Una vez hecho esto, se deberá calcular la sumatoria de los productos  $PRx$ ,  $PRy$  y  $PRz$ , (matemáticamente equivalente a calcular el área bajo la curva), cuyos valores corresponderán a  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  respectivamente.

Una vez obtenidos los valores de  $x$ ,  $y$  y  $z$ , es útil calcular sus *coordenadas cromáticas*, las cuales describirán su *cromaticidad*, es decir, la combinación de colores que le ha dado origen, por ejemplo: si en un *diagrama de cromaticidad* ubicamos un color como amarillo-verdoso, entenderemos que el color predominante es el amarillo, pero con un tono verdoso (estos términos también se conocen, por sus nombres en inglés como *hue* y *chroma* respectivamente). Además, existe un tercer parámetro, la *luminosidad*, la cual indica si un color es claro u oscuro (Op. cit. Billmeyer).

#### 4.5.- SISTEMAS DE TIPO OPUESTO

Existe además otra manera de describir el color en forma de coordenadas, en términos de lo que comúnmente se denomina como *coordenadas de color opuesto*. La idea que respalda este concepto es la de que, en algún lugar, entre el ojo y el cerebro, las señales recibidas por las células fotosensibles del primero codifican las señales en la forma de blanco-negro, rojo-verde, y amarillo-azul, es decir, en tonos y colores opuestos. En las coordenadas de color opuesto, el argumento principal es el de que un color no puede ser rojo y verde o amarillo y azul al mismo tiempo, pero que, por el

contrario, si puede ser amarillo y rojo al mismo tiempo, como en el caso de los naranjas, o bien rojo y azul, como en el caso de los púrpuras.

Así, el grado de rojo o verde de una muestra puede ser expresado por un número (representado por la letra  $a$ ), el cual es positivo si el color es rojo y negativo si el color es verde. De manera similar, el eje amarillo-azul (denotado por  $b$ ), será positivo para todos aquellos tonos amarillos, mientras que los azules predominarán en la contraparte negativa del eje. Una tercer coordenada describirá el grado de brillantez del color, siendo denotado por la letra  $L$  (Francis, 1975).

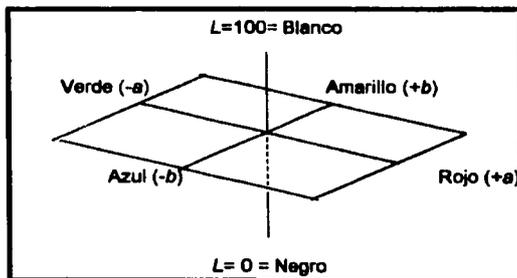


Fig.4.1.- El sistema coordenado  $L, a, b$

En el presente trabajo, la medición y el análisis de color se llevarán a cabo empleando el sistema  $L, a, b$ , dado que se trata del sistema que más se adecua, desde nuestra perspectiva, a los fines que el mismo persigue, por lo que en lo sucesivo se hará referencia, exclusivamente, a este sistema.

#### 4.6.- DIFERENCIAS DE COLOR

La posibilidad de expresar la diferencia entre dos colores a través de un número ha intrigado a los investigadores por mucho tiempo, por lo que numerosos métodos han

sido concebidos desde los inicios de la investigación colorimétrica. Este concepto de diferencia de color es fácilmente entendible si consideramos que cuando queremos estimar la diferencia entre dos colores, A y B, primeramente deberemos localizar cada uno de estos puntos dentro de un sistema coordinado de color. Es entonces cuando la diferencia de color se hace evidente y esta es cuantificada calculando la distancia a que ambos puntos están separados.

A lo largo de los años, ha sido evidente la gran complejidad matemática que el hecho de establecer una unidad de color conlleva por si misma, dados los numerosos ajustes requeridos en una expresión matemática que arroje datos sobre diferencias de color y que éstos sean plasmados en un sistema de coordenadas. Los ajustes y fórmulas han sido demasiado complejas como para permitir su empleo rutinario sin un equipo de cómputo, por lo que los métodos gráficos desarrollados posteriormente observan la tendencia a disminuir, al mínimo posible, el uso de éstos.

La forma en que se lleve a cabo una medición de color dependerá, en gran medida, de las facilidades con que el equipo con el que se cuente otorgue. De igual manera, algunos autores recomiendan que el método empleado para determinar la diferencia de color se elija en función del sistema elegido para llevar a cabo dicha medición de color.

El sistema  $L, a, b$ , considera la siguiente expresión matemática para determinar numéricamente la diferencia entre dos colores

$$\Delta E = [(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2]^{1/2} \quad (16)$$

en donde la diferencia de color está denotada por  $\Delta E$  (adimensional).

Cabe hacer notar que los valores obtenidos por cada método existente nunca serán idénticos a los obtenidos por algún otro método, por lo que, cuando una diferencia de color a través de un proceso forme parte de la especificación de algún producto, por ejemplo, tal diferencia deberá ser especificada junto con el método empleado para ello.

## CAPITULO CINCO

### LAS BASES QUÍMICO-FISIOLÓGICAS DE CALIDAD EN ALIMENTOS DE ORIGEN VEGETAL

Color, sabor, textura y valor nutritivo son generalmente reconocidos como los cuatro factores de calidad en muchos alimentos, especialmente en frutas y vegetales. Respecto a estos últimos, pigmentos naturales como las clorofilas, carotenoides y antocianinas, así como el oscurecimiento enzimático y no enzimático derivado del procesamiento, forman la base química de lo que conocemos como color. Varios aromas, compuestos volátiles y no volátiles confieren a las frutas y vegetales sabores especiales. Los componentes de las paredes celulares y la presión interna de las células son las dos entidades responsables de la textura de los vegetales y las frutas. Las sustancias pécticas así como sus enzimas están muy cercanamente relacionadas con la firmeza y suavidad de muchas frutas y vegetales. La vitamina C y los minerales son los mayores nutrientes de frutas y vegetales. El procesamiento suele incidir sobre la calidad de los productos, pero no cambiará la base química de dichos factores cualitativos (Jen, 1985).

Las frutas y los vegetales constituyen una parte importante en la dieta humana, siendo uno de los cuatro grupos más importantes en nuestra ingesta diaria. Las nuevas tendencias de consumo están orientadas hacia aquellos productos naturales y frescos, mínimamente procesados.

En lo sucesivo se hará énfasis solo en lo que a color y textura se refiere, dado el rumbo del presente trabajo, haciendo mención en cuanto a sabor y valor nutricional solo hasta donde el mismo lo requiera. Primeramente abordaremos los temas de color y textura desde una óptica puramente fisiológica, ya que ambos temas han sido ya tratados, en capítulos anteriores, desde un punto de vista meramente físico.

## 5.1.- COLOR Y PIGMENTOS

Con muy pocas excepciones, la materia colorante de frutas y vegetales pertenecen a una de las siguientes categorías de compuestos químicos:

1. Derivados de tetrapirroles: clorofilas, feofitinas;
2. Derivados de isoprenoides: carotenoides, xantofilas;
3. Derivados de benzopiranos: antocianinas, flavonoides;
4. Compuestos varios: caramelos, melaninas, etc.

Mientras que los compuestos mencionados en el cuarto grupo son productos de reacciones de oscurecimiento enzimático y no enzimático que se llevan a cabo de forma natural debido a cambios fisiológicos en frutas y hortalizas, los compuestos pertenecientes a los tres primeros grupos son pigmentos naturales (Bor, 1982).

Los colores vivos de las verduras contribuyen al placer estético de comer. Frecuentemente estos colores vivos han cambiado antes de servir las verduras, por lo que es esencial conocer un poco la estructura y las reacciones básicas de los pigmentos de las plantas para comprender los cambios que se llevan a cabo en el color de las verduras y cómo éstos se pueden mantener al mínimo.

### 5.1.1.- Clorofilas

Las verduras verdes, especialmente, pueden sufrir marcados cambios en el color. El pigmento involucrado es la clorofila. Una molécula de clorofila tiene cuatro grupos pirroles, cada uno con un anillo de cinco miembros formado por cuatro átomos de carbono y uno de nitrógeno. Los cuatro grupos pirroles se unen para formar un anillo de porfirina como en la mioglobina. En lugar del átomo de hierro en la molécula de mioglobina, la clorofila contiene magnesio. El alcohol fitol está unido por un enlace éster a uno de los grupos pirroles y el alcohol metílico a otro. El residuo fitil con 20 átomos de carbono en la cadena, es la parte de la molécula que confiere a la clorofila su solubilidad en compuestos grasos. Dos formas de clorofila, la clorofila *a*, que tiene un color verde intenso, y la clorofila *b*, de color amarillo verdoso más opaco, se encuentran

en las plantas de la tierra. Las dos clorofilas están presentes en una proporción aproximada de tres partes de clorofila a con una parte de clorofila b. La diferencia entre ambas clorofilas es tan sólo la presencia de un grupo formil en la b en el lugar en que se encuentra un grupo metil en la variedad a.

El magnesio es fácilmente desplazado de la molécula de la clorofila cuando se le calienta en la presencia de ácidos orgánicos. El hidrógeno reemplaza al magnesio y un compuesto verde grisáceo pálido conocido como feofitina a o bien se obtiene una feofitina b color verde oliva.

Cuando una verdura verde se pone a cocer primero en agua hirviendo, el color verde se torna más brillante posiblemente a la mayor transparencia del tejido vegetal debido a la expulsión de aire intercelular. A medida que continúa la cocción, los constituyentes, incluyendo los ácidos orgánicos, se difunden desde las vacuolas a través de toda la célula hacia el agua de cocimiento. Al ponerse en contacto los ácidos con las clorofilas, éstas últimas se convierten en sus respectivas feofitinas. Ya sin estar enmascarados por el intenso color de la clorofila verde, los pigmentos amarillos y naranja presentes en el tejido de las plantas verdes, ahora se muestran junto con los verdes. Esta combinación, junto con las feofitinas, da a la verdura un color verde olivo cenizo. Las verduras verdes que tienen menos ácidos, retienen un mayor porcentaje de clorofila y de su color verde cuando son cocidas, que verduras todavía más ácidas.

La destrucción de la clorofila aumenta con el tiempo de cocimiento. La retención de la clorofila en el brócoli descendió del 82.5% cuando el tiempo de cocimiento fue de 5 minutos, hasta el 31.3% cuando el tiempo fue de 20 minutos. Al final del cocimiento de 5 minutos, la retención de clorofila a fue del 78.7%, y la de la clorofila b, de 90.3%. Luego de una cocción de 20 minutos las retenciones fueron de 18.4 y 57.6%, respectivamente. Por tanto, la clorofila a se convierte más fácilmente a feofitina que la clorofila b, con un mayor detrimento del color (Op. cit. Badui; Op. cit. Cheftel; Op. cit. Jen).

### 5.1.2.- Carotenoides

Los carotenoides incluyen los pigmentos amarillo, naranja y rojo-naranja solubles en grasas. Se encuentran en los cloroplastos de las hojas verdes, donde están enmascarados por la alta concentración de clorofila y en las verdura amarillas como los camotes, calabazas y zanahorias. El pigmento rojo en los tomates, es un carotenoide, el licopeno. Los pigmentos carotenoides son de dos tipos, carotenos y xantofilas. Los carotenos, que incluyen  $\alpha$  y  $\beta$  caroteno y licopeno son hidrocarburos con 40 átomos de carbono en la molécula. Las xantofilas contienen, además del carbono y el hidrógeno, uno o más átomos de oxígeno. El  $\beta$ -caroteno es el carotenoide más común. Una molécula tiene una cadena central de átomos de carbono que se une a las estructuras de anillos de 6 miembros en cada extremo de la molécula. En el cuerpo humano, una molécula de  $\beta$ -caroteno puede dar lugar a las dos moléculas de la vitamina A incolora. El  $\alpha$ -caroteno difiere del  $\beta$ -caroteno en que la posición del doble enlace en uno de los anillos cambia a los carbonos 4' y 5'. El  $\alpha$ -caroteno tiene sólo la mitad del valor de vitamina A del  $\beta$ -caroteno. En el licopeno, los anillos de cada extremo de la molécula se abren y la molécula tiene dos dobles enlaces más que los carotenos  $\alpha$ - y  $\beta$ -.

La luteína es una xantofila ampliamente distribuida en las hojas verdes. Tiene la misma estructura que el alfa caroteno, excepto que un grupo radical  $-\text{OH}$  ha reemplazado a un hidrógeno en el carbono 3, y otro  $-\text{OH}$  a un hidrógeno en el carbono 3'. Otra xantofila, la criptoxantina, presente en el maíz amarillo, tiene la misma estructura que el beta caroteno, excepto que un  $-\text{OH}$  ha reemplazado a un hidrógeno en el carbono 3'. La zeaxantina, más ampliamente distribuida que la criptoxantina es un 3,3'-dihidroxi- $\beta$ -caroteno. Una molécula de criptoxantina forma una molécula de vitamina A. la luteína y la zeaxantina no tiene valor de vitamina A.

El color rojo-naranja del  $\beta$ -caroteno se debe al gran número de dobles enlaces conjugados (dobles enlaces alternados con enlaces simples) en la molécula. Normalmente, la porción central de la molécula se encuentra en la forma *trans*, lo que hace lineal esta parte de la molécula. Los dobles enlaces son capaces de resonancia y son la causa del color de los pigmentos carotenoides. El color más vivo del licopeno se

debe a los dos dobles enlaces en la molécula. La sandía, la toronja sandía y los escaramujos (el fruto de la rosa), además de los tomates contienen licopenos.

La isomerización de la molécula ocurre cuando estos carotenoides insaturados se calientan en presencia de ácidos. La forma *-trans* del pigmento, cambia a una combinación *cis*. El cambio ocurre en un doble enlace, en cuyo caso, la molécula ya no es lineal. Este cambio en la forma reduce la resonancia en la molécula, y así, la intensidad de color. El  $\beta$ -caroteno en la forma *cis*, por ejemplo, cambia del típico rojo-naranja a un amarillo-naranja más pálido.

Un cambio en el color de una verdura que contiene pigmentos carotenoides, no es tan notorio como el que frecuentemente ocurre en una verdura verde. Los carotenoides solubles en grasas no se pierden hacia el agua de cocimiento, aunque cantidades apreciables pueden disolverse en la grasa de masa utilizada para sazonar una verdura como la zanahoria. Cuando las rebanadas de camote o de zanahoria han estado en contacto con el agua hirviendo durante dos a tres minutos, el color cambia directamente hacia el amarillo. El  $\beta$ -caroteno en la verdura cruda se localiza en los cromoplastos y en las zanahorias, el pigmento altamente concentrado se deposita como cristales en una variedad de formas por todo el citoplasma de las células. Estos cuerpos con carotenos se pueden observar bajo el microscopio en los cortes a mano de zanahoria cruda. Una breve exposición al agua hirviendo ocasiona que el  $\beta$ -caroteno se disuelva en los lípidos, apareciendo como gotitas cerca de la periferia de la célula. En esta forma un cambio en el estado físico del pigmento explica el cambio inicial en el color.

El calentamiento más prolongado y especialmente el recocimiento, puede dar lugar a un cambio *trans-cis*, con cierta pérdida en la intensidad del color. Entre más tiempo se cuece la verdura y mayor es la temperatura, mayor es el cambio en el color. Debido a la cantidad de caroteno presente, las zanahorias cocidas aún se conservan brillantes y con un color atractivo. Durante el cocimiento, algunas de las moléculas se isomerizan a la forma *trans* más llena de color (*idem*).

### 5.1.3.- Antocianinas

Estos pigmentos de la savia celular solubles en agua pueden extraerse de una verdura mediante el agua de cocimiento. El cocimiento en una vaporera o en una olla de presión, o mediante el salteado que limitan el contacto de la verdura con el agua, son mejores métodos que el agua hervida para evitar la pérdida de las antocianinas de las verduras debido a la disolución. Si la verdura se hierve, una pequeña cantidad de agua de cocimiento reduce la disolución de los pigmentos de este grupo. La col morada es una de las verduras que contiene antocianinas que se acostumbra especialmente en ciertas regiones de los Estados Unidos. El pigmento en la col morada es realmente color púrpura en el tejido crudo. Está limitado a las capas externas de las células de la hoja de la col. A menos que el agua de cocimiento se acidifique, el pigmento cambiará a un color azul opaco y poco apetitoso. Es para evitar esto que en ocasiones se incluyen rebanadas de manzana agria con la col morada cuando ésta se cuece. Ciertos minerales reaccionan con los pigmentos para producir un complejo de color azul. La col morada cortada con una hoja que no sea de acero inoxidable, como un pelador de hojas flotantes, cambia al color azul rápidamente debido a la reacción entre el hierro del pelador y el pigmento de la verdura. La adición de ácido cambia el pigmento al ion flavilio y a un color rojo (*idem*).

### 5.1.4.- Antoxantinas

Normalmente, estos compuestos hidrosolubles carecen de color en los tejidos vegetales, por lo que pueden pasar desapercibidos en las verduras, así como en las frutas. En un medio alcalino pueden adquirir un color blanco cremoso o amarillo. Las cebollas, la coliflor, los nabos y la col blanca, contienen en su totalidad flavonoles. Si las tres últimas verduras se cuecen en un recipiente cubierto por mucho tiempo, como es costumbre en algunas partes, el sulfuro de hidrógeno se liberará de los compuestos que contienen sulfuro. Desde el punto de vista químico, los flavonoles están estrechamente relacionados con las antocianinas, excepto que los primeros están en un estado mayor de oxidación. El sulfuro de hidrógeno es un agente reductor, y este compuesto presumiblemente reduce las moléculas de los flavonoles presentes en la verdura a antocianinas. El color rosado en la col, la coliflor y los nabos recocidos, se atribuye a la

conversión de una pequeña cantidad de pigmento incoloro y más altamente oxidado a una antocianina con color y menos oxidada (*idem*).

#### 5.1.5.- Pigmentos derivados de reacciones enzimáticas y no enzimáticas

Los enzimas conocidos como polifenoloxidasas (fenolasas, tiroxinasas, etc.) son las responsables del fenómeno conocido como pardeamiento u oscurecimiento enzimático, las cuales catalizan la conversión de monofenoles y difenoles a compuestos llamados quinonas, las cuales, a su vez, pueden llevar a cabo una serie de reacciones no enzimáticas que derivarán en la formación de pigmentaciones marrón, gris e incluso negras denominadas colectivamente como melaninas. Las reacciones de Maillard, caramelizaciones y la oxidación del ácido ascórbico pueden producir tipos similares de compuestos colorantes.

La inactivación total de enzimas significa que no se deberán llevar a cabo reacciones químicas en alimentos procesados. Sin embargo, algunas reacciones químicas no-enzimáticas pueden llevarse a cabo durante el procesamiento, además del oscurecimiento o pardeamiento no-enzimático ya mencionado, tales como las hidrólisis no específicas de macromoléculas, interconversión de azúcares, agregación de monómeros disociación de polímeros y cambios en los enlaces iónicos en las paredes celulares, que, aunque no han sido tan profundamente estudiados, pueden igualmente dar origen a coloraciones indeseadas (Op. cit. Badui; Op. cit. Bor).

#### 5.2.- TEXTURA

La textura es probablemente el factor más elusivo de todos los factores consistentes de la calidad de frutas y vegetales. A lo largo de la historia los científicos se han esforzado por encontrar la correcta definición de dicho término, encontrándose en la actualidad numerosas acepciones más o menos similares. En términos químico-alimenticios, la textura de frutas y vegetales es el resultado conjunto de las propiedades de las biomoléculas constituyentes de las paredes celulares de estos. La degradación natural de dichos componentes durante las transiciones fisiológicas y el procesamiento de los alimentos pueden llegar a obrar en detrimento de las propiedades texturales. El tamaño

y la forma de las células y la presión turgente son los factores que determinan los parámetros texturales de frutas y hortalizas, siendo las más importantes la dureza y la firmeza (Helen, 1999).

Las macromoléculas de las paredes celulares vegetales en que se ha puesto más atención son las sustancias pécticas, así como los enzimas que hacen de éstas sus sustratos. Las sustancias pécticas actúan a manera de "pegamento" intercelular, encontrándose principalmente en las lamelas, de igual manera, en el espacio intercelular.

Concretamente, las sustancias a las que hemos hecho referencia son las protopectinas, ácidos pectínicos y ácidos pécticos. La protopectina es una larga cadena polimérica de ácido  $\alpha$ -1,4-D-galacturónico intercalado con residuos de  $\alpha$ -1,2-L-ramnosa que, junto a polímeros más pequeños que se encuentran unidos covalentemente a la cadena principal, y en distintas proporciones, toman variadas formas en los diferentes tejidos vegetales. Polisacáridos y proteínas estructurales, así como sustancias inorgánicas como el calcio y el magnesio, parecen jugar un importante papel en la firmeza de los vegetales tanto crudos como procesados. Los iones divalentes pueden formar un puente entre los grupos carboxilos libres de las cadenas pécticas, dando así rigidez a la estructura celular. Las paredes celulares de una gran cantidad de plantas contienen pectinas con un alto grado de metoxilación pero pocos grupos carbonilos libres con los cuales reaccionar (Op. cit. Jen).

Otros polisacáridos presentes en las paredes celulares, las celulosas, hemicelulosas y ligninas han recibido menor atención que los compuestos pécticos, ya que las celulosas y las ligninas se encuentran asociadas con estructuras leñosas y otros atributos texturales indeseables. Las proteínas estructurales de las paredes celulares, las extensinas, son compuestos pobremente estudiados y que no obstante sus pequeñas concentraciones, pudieran proporcionar información necesaria para la completa explicación de muchos fenómenos de carácter textural asociados al período de senescencia en frutas y vegetales.

No perdamos de vista que los vegetales crudos son organismos vivos en cuyo seno se llevan a cabo cambios fisiológicos después de su cosecha. El fin que se persigue al procesarlos es el de detener las actividades fisiológicas y enzimáticas con un mínimo detrimento de su estructura celular.

#### 5.2.1.- Efectos del cocimiento sobre la textura de las verduras

Una verdura cruda de alta calidad tiene una textura crujiente, debido a la presión que las células turgentes ejercen una sobre otra. Cuando los fragmentos crujientes de una verdura cruda se someten a calentamiento empleando agua hirviendo, el calor desnaturaliza el citoplasma y las membranas celulares. Las células ya no retienen agua; en su lugar pierden agua por difusión a través de las membranas ahora permeables. La flacidez de las verduras cocidas, en contraste con la textura crujiente de las crudas se debe a esta pérdida de agua. La pérdida de agua de las células muertas por el calor hace que la mayoría de las verduras pesen menos que cuando estaban crudas, aún cuando estén cocidas en suficiente agua. Las verduras con almidón, como las papas, son una excepción. Esta pérdida de agua se refleja en un menor tamaño en las células del floema de alimentos como la zanahoria al ser hervidas en forma convencional (Fellows, 1994; Op. cit. Jen).

Las paredes en las células del tejido vegetal sirven como elementos estructurales, es decir, proporcionan el sostén de la planta. La adhesión de las paredes de la célula adyacentes contribuye con las cualidades de textura de las verduras crudas. El material de cemento entre las células, es decir, sustancias pécticas y hemicelulosas, hace que aquellas se adhieran de tal forma que la verdura cruda resista la presión de los dientes al ser masticada.

Para una mayor suavidad, es deseable menos integridad estructural en las verduras cocidas que en las crudas, sin embargo, las verduras no deben cocerse hasta el grado que pierdan completamente aquellas cualidades de textura por las que se les valora. La cocción convierte a las sustancias pécticas insolubles en sustancias solubles en el agua caliente y altera otros materiales estructurales asociados con las paredes celulares. Si el período de cocimiento es muy breve, las verduras pudieran no

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

suavizarse debido a que las células se adhieren demasiado. Una gran alteración en los componentes estructurales puede resultar en un producto masudo que se desintegra con la mínima presión. El grado en que la textura de una verdura se altera por el cocimiento depende del patrón de elaboración utilizado.

La industria alimenticia busca continuamente nuevas y mejores tecnologías que deriven en productos procesados de mayor calidad a un menor costo. Departamentos de investigación y desarrollo de las industrias alimenticias, instituciones académicas y de investigación están, todos, interesados en estos campos. En suma a todos los procesos tradicionales de enlatado, congelado, deshidratación, etc, muchas nuevas técnicas han sido dadas a conocer en años recientes, tales como la irradiación con rayos gamma, almacenamiento en atmósferas controladas y modificadas, osmosis inversa y ultrafiltración, por citar sólo algunos.

Cuando un vegetal fresco es procesado térmicamente, su color, sabor, textura y contenido nutrimental seguramente se verá alterado en mayor o menor grado. La intención de la ingeniería en alimentos es, entre otras de no menor importancia, disminuir estas alteraciones en aras de la mejora constante de los factores cualitativos.

## CAPITULO SEIS

### LOS OBJETOS DE ESTUDIO

La variedad de colores y texturas ofrecidas por *Solanum tuberosum*, *Daucus carota* y *Capsicum annuum* (papa, zanahoria y chile, respectivamente), así como su importancia en la alimentación del pueblo mexicano (SAGAR, 1998),(SAGAR,2000), les ha valido su elección como objetos de estudio dentro del presente trabajo. Colores como el verde y el anaranjado, debidos a la presencia de pigmentos como las clorofilas y los carotenos, considerados a menudo como los colores más atractivos por los consumidores, así como las texturas fibrosa de la zanahoria y consistente de la papa, hacen de estos vegetales especimenes idóneos para el propósito que este trabajo persigue.

A continuación se describirán brevemente las principales características de cada uno de ellos

#### 6.1.- PAPA (*Solanum tuberosum*)

Este vegetal, cuya variedad blanca o alpha (estudiada en el presente trabajo), es una de las más conocidas y comercializadas en México, crece en todas las regiones del mundo y solo es superado, en producción, por el trigo, el maíz y el arroz, por lo que se considera como uno de los cultivos más importantes en el mundo.

Los primeros indicios de que se tiene registro sugieren que la planta de la papa se cultivó por primera vez hace entre 7000 y 4000 años en las regiones andinas de Bolivia, Ecuador, Chile y Perú, aunque probablemente su uso se remonte más atrás, ya que al parecer los cultivos debieron ser, primeramente seleccionados, dada la existencia de algunas especies salvajes tóxicas. Se ha podido demostrar, que algunas variedades silvestres, son originarias de México (Ensminguer, *et. al*, 1983).

La importancia de este cultivo en nuestro país, radica básicamente en dos hechos:

a) por un lado, su alto valor alimenticio, ya que los especialistas consideran que la papa contiene carbohidratos, proteínas, celulosa, minerales, así como vitaminas E, C y del complejo B. De igual forma, se considera que bajo las condiciones apropiadas, la papa tiene un contenido mayor de nutrientes que los cereales, de tal forma que le sigue en importancia a la soya, la cual ocupa el primer lugar en cuanto al rendimiento de proteínas vegetales por hectárea.

b) Por otro lado, la importancia económica que tiene dicha hortaliza, se debe al ingreso que proporciona a sus productores, así como a la cantidad de jornales que genera en las diferentes regiones productoras, sobre todo durante el período de cosecha (SAGAR, 2000).

La papa se cultiva en gran parte del territorio nacional. Dichos cultivos se distribuyen en las regiones noroeste, noreste, norte-centro, centro, pacífico-centro, pacífico-sur y golfo centro. De ese total de entidades, cinco concentran el 52% de la superficie total cosechada y el 54% del total de la producción; estos son, por orden de importancia, Sinaloa, Estado de México, Puebla, Guanajuato y Nuevo León (SAGAR, 2000)

La papa es una planta dicotiledónea herbácea anual, que pertenece a la familia de las Solanáceas; potencialmente es una planta perenne debido a que es capaz de reproducirse por tubérculos, los que, por su parte, constituyen la parte comestible de la planta, y aunque no son parte de la raíz, al igual que esta, crecen subterráneamente.

Los tubérculos de la papa, ovoides o cilíndricos, con piel blanca, amarilla, rosa o violeta, igual que la carne, pesan de 50 a 500 gramos, según la variedad y la edad a la que se cosechan. Una recolección precoz proporciona tubérculos muy pequeños, de piel fina, más sabrosos.

El tipo y la cantidad de las sustancias que constituyen el tubérculo son variables y están muy relacionadas con la variedad y con las condiciones de crecimiento, sin embargo, como composición media puede citarse la siguiente:

Cuadro No. 1.- Composición media de *Solanum Tuberosum*  
(Ref. Diccionario de los alimentos. 1984)

COMPONENTES	%
<b>MAYORITARIOS</b>	
AGUA	65-85
HIDRATOS DE CARBONO	15-28
PROTEÍNAS	1-4
GRASAS	0.05-0.9
CENIZAS	0.5-1.5

SALES MINERALES	%
POTASIO	0.531
SODIO	0.038
CALCIO	0.022
MAGNESIO	0.046
HERRO	0.002
FÓSFORO	0.110
AZUFRE	0.177
CLORO	0.049

VITAMINAS	mg
VITAMINA B1	0.5
VITAMINA B2	1.0
VITAMINA B6	0.2
VITAMINA C	10
VITAMINA E	0.1

Otros constituyentes que entran en la composición del tubérculo fresco, en menor proporción, son: azúcares, polisacáridos no amiláceos, enzimas, ácido ascórbico, otras vitaminas, sustancias fanólicas, ácidos nucleicos, etc.

Entre las características que definen la calidad de las papas se encuentran la firmeza, forma y textura, así como algunas otras como color externo, forma y tamaño que dependerán del estado de madurez, época del año de cosecha, tiempo y condiciones de almacenamiento, variedad y lugar de cultivo. Las papas pequeñas suelen destinarse a la producción de purés de papa, papillas, croquetas y otros productos similares, mientras que las mayores son cortadas en tiras que posteriormente a un escaldado, serán congeladas (papas fritas a la francesa). El consumo de papa en fresco ha decaído desde la Segunda Guerra Mundial, mientras que, por el contrario, su consumo en formas procesadas ha aumentado hasta el punto de superar la mitad de la producción total, siendo las papas a la francesa, los productos deshidratados y, por supuesto, las papas fritas (chips), los principales productos industrializados (Talbur, 1987)

## 6.2.- ZANAHORIA (*Daucus carota*)

La raíz comestible de esta planta es uno de los cultivos vegetales más ampliamente distribuidos a lo largo del mundo, además de ser considerada como uno de los vegetales que mayores bondades ofrece al organismo humano, ya que además de ser un alimento rico en minerales, es considerada como la fuente más rica de vitamina A de todos los vegetales comúnmente consumidos (aunque esta no se encuentra presente como tal, sino que se encuentra en forma de pro-vitamina). Las zanahorias pertenecen a la familia *Umbelliferae*, en donde el apio, el hinojo y el perejil son otros miembros bien conocidos de este grupo.

La historia de la zanahoria es por demás antigua, aunque el tema de su origen sigue siendo incierto. Se cree que esta especie tuvo sus orígenes en Oriente próximo y Asia central, en donde han sido cultivados por miles de años. Sin embargo, los ancestros de las formas modernas de este vegetal no eran de color amarillo-naranja, sino que presentaban colores púrpuras e incluso pigmentaciones casi negras.

Aparentemente, las formas con las pigmentaciones actuales surgieron a partir de mutantes carentes de pigmentos púrpuras. Probablemente los europeos comenzaron a incluir a las zanahorias en su dieta ya en la Edad Media y en el siglo XIV fueron introducidas a China, país que a la postre se convertiría en el mayor productor, en el ámbito mundial, de este cultivo. Algunos siglos después, los colonizadores europeos introducirían la zanahoria a tierras americanas (op. cit. Ensminguer)

La zanahoria es un producto importante para la industria conservera, a quien se destinan cantidades importantes de su producción para su procesamiento ya sea en forma congelada o enlatada (curiosamente, la zanahoria fue el primer vegetal sometido a un proceso de apertización). A diferencia de otros vegetales, también es importante como hortaliza para consumo en fresco, aunque su uso dependerá a la variedad a la que pertenezca, la cual estará determinada con base a la forma de su raíz. Normalmente las variedades de zanahorias pertenecen a una de 5 categorías (Ámsterdam, Nantes, Chatenay, Berlicum y Autum King), aunque actualmente se tiende a introducir, principalmente en Europa, variedades genéticamente modificadas, que son el resultado de cruces entre distintos grupos, con el propósito de incorporar las mejores características de estos. En el presente trabajo, el objeto de estudio pertenece a la variedad Chatenay.

En lo que se refiere a México, podemos mencionar que en la década de los 90, aunque la producción de zanahorias se llevó a cabo en cerca de 21 entidades, en conjunto, 5 de ellos concentraron cerca del 83% de la superficie sembrada, así como el 85% de la producción total. Los estados a los que se hace referencia son Guanajuato (considerado como el principal productor del país), seguido por Puebla, Zacatecas, Estado de México y Baja California (SAGAR, 1998).

La zanahoria que se produce en nuestro país, es absorbida en su gran mayoría por el mercado nacional. Tan sólo se considera que durante la década de los 90, cerca del 88% de la producción total fue consumida por la población nacional. La venta en el mercado nacional se hace esencialmente en estado fresco, del cual el 90% se destina para los diversos usos que los consumidores particulares pueden hacer de ella entre las

que destacan elaboración de ensaladas caseras, extracción de jugo o bien en los diferentes platillos de la cual puede formar parte.

De igual forma, se considera que el restante 10% es destinado para el uso de la agroindustria, sobre todo en la elaboración de ensaladas o complemento de chiles enlatados.

En el mercado nacional es posible encontrar diversas variedades de zanahoria, las que dependen del tipo de semilla que utilizan los diferentes productores, sin embargo, en la práctica comercial lo que funciona es la distinción de tres tamaños:

-Zanahoria Leña: son aquellas que en el mercado se distinguen como las de mayor tamaño, es decir, superiores a los 12.5 cm y un grosor entre 2 y 4 centímetros. Este tipo de zanahoria es el que se destina para su exportación, ya que reúne las condiciones necesarias para soportar traslados lejanos.

-Zanahoria Mediana: es la que mayor preferencia tiene en el mercado nacional, por lo que los productores prefieren extraerlas cuando han alcanzado este tamaño, que se ubica entre los 9.5 y los 12.5 centímetros de longitud y de 2 a 3 de grosor.

-Zanahoria Polvo: son las que encontramos en el mercado como las de menor tamaño, y cuyo uso es agroindustrial en la elaboración de ensaladas y como complemento de chiles enlatados. Su tamaño es menor a 9.5 cm de longitud (SAGAR, 1998).

Las zanahorias de buena calidad deben ser firmes, frescas, lisas, bien formadas y coloreadas. Zanahorias con características indeseables (marchitas, suaves, flácidas o arrugadas), por norma general, suelen desecharse, aunque hay algunas que, al ser excesivamente duras, también contribuyen a los desperdicios.

Algunas variedades como la Chatenay son cultivadas tradicionalmente para su consumo en fresco, aunque en algunos países como el Reino Unido se enlatan enteras. Otros tipos, de forma más cilíndrica, se destinan a su congelación ya sea enteras, en cubos, rebanadas o tiras. En general, para conservar enteras se requieren raíces pequeñas y las mayores son mejores para cortar en tiras o en dados. Durante su procesamiento, las zanahorias son sometidas a diversos tratamientos térmicos,

incluidas las operaciones de pelado y escaldado, por ejemplo, en el que son sometidas a altas temperaturas hasta por lapsos superiores a los 7 minutos.

La composición promedio de la zanahoria se desglosa en los siguientes cuadros, pero cabe resaltar su alto contenido de vitamina A, que si bien se encuentra reportado como tal, esta se encuentra en formas pro-vitámicas tales como los carotenos  $\alpha$  y  $\beta$ .

Cuadro No. 2.- Composición media de *Daucus Carota*  
(Ref. Diccionario de los alimentos.1984)

COMPONENTES	%
<b>MAYORITARIOS</b>	
HIDRATOS DE CARBONO	9.0
GRASAS	0.3
PROTEÍNAS	1.2
CELULOSA	0.9
AGUA	88.0
CENIZAS	0.6
<b>SALES MINERALES</b>	
POTASIO	0.290
SODIO	0.100
CALCIO	0.041
MAGNESIO	0.017
HIERRO	0.007
FÓSFORO	0.032
AZUFRE	0.022
CLORO	0.050
MANGANESO	0.0008
CINC	0.0003
COBRE	0.00014
YODO	0.000009

VITAMINAS	
VITAMINA A	10,000 UI
VITAMINA B1	0.0001 g
VITAMINA B2	0.00005 g
VITAMINA PP	0.0004 g
VITAMINA C	0.0094 g

### 6.3.- CHILE (*Capsicum spp.*)

En México, el cultivo del chile es toda una tradición apenas comparada con el maíz y el frijol. Ha cumplido diversas funciones de carácter alimenticio y económico, que le han permitido trascender hasta hoy día.

Es una hortaliza que se produce en casi todo el país en los dos ciclos agrícolas y forma parte del grupo de los principales productos hortofrutícolas exportados. No obstante, el 80% de la producción nacional se consume internamente, lo que determina su importancia como alimento, ya que, además de ser un producto rico en vitaminas y minerales, es un condimento que está presente, no solo en la mayoría de los platillos mexicanos, sino en una buena cantidad de platillos de otras naciones (SAGAR, 1998).

Nuestro país es la región del mundo en donde se produce no solo el mayor volumen de chile en fresco (y quizá también en seco), sino que además, el mayor número de variedades, las cuales dependen de la región (ya que algunas se adaptan mejor a ciertas condiciones ambientales), así como de la cultura productiva y de consumo. Por ejemplo, es posible distinguir que en la zona del golfo destacan las variedades de Jalapeño y Serrano; en el bajo predominan los chiles secos como el Ancho, Pasilla y Mulato; en la Mesa Central el Poblano, Serrano, Carricillo; en el Pacífico Norte el Pimiento Bell, Anaheim, Caribe y Fresno; mientras que en el sur aparece nuevamente el Jalapeño, pero ahora combinado con variedades locales como el Costeño y el Habanero (Nuez, 1996).

Aún cuando el cultivo de chile es una práctica generalizada en todo el territorio nacional, podemos señalar, en términos estrictos, que son 5 las entidades que concentran más del 50% de la superficie sembrada y cosechada y el 60% de la producción nacional. En orden de importancia: Sinaloa, Chihuahua, Guanajuato, Zacatecas y Sonora (SAGAR, 1998).

El chile se cultiva como una planta herbácea anual. Su aspecto es lampiño, de tallos erguidos y de crecimiento limitado, con altura y forma de desarrollo muy variables en función del cultivar y de las condiciones de cultivo. Las hojas enteras tienen una forma entre lanceolada y ovada. El fruto es una baya hueca, con la superficie lisa y brillante de color y forma muy variables. En el interior de la baya discurren 2 o 4 tabiques incompletos a lo largo de la pared del fruto, uniéndose sólo en la base sobre la placenta. En esta región se insertan las semillas, aplastadas, normalmente de 4 a 5 mm de diámetro, de color blanco amarillento.

Todas las formas de chile, así como sus variedades dulces (pimientos), pertenecen al género *Capsicum*. El nombre científico del género deriva del griego: según unos autores de *kapsó* (picar), según otros de *kapsakes* (cápsula).

#### 6.3.1.- Chile jalapeño (*Capsicum annuum*)

El chile Jalapeño es, con toda seguridad, el chile más popular de América del Norte. Esta variedad es recolectada en estado inmaduro, con un color verde intenso y brillante, para la industria conservera a la cual se destina cerca del 60% de la producción, mientras que el consumo en fresco abarca el 20%. El restante 20% de la producción, es decir rojos, se destina a la elaboración de chipotle, el cual se obtiene tras el secado y ahumado de los frutos (*op. cit.* Nuez).

Esta variedad cotiza durante todo el año en el mercado nacional debido a la diversidad de estados productores, entre los que podemos mencionar a Chihuahua, considerado como el principal abastecedor, Sinaloa, Michoacán, Veracruz, Chiapas, Colima y Sonora.



El contenido nutricional del chile es alto en comparación con otras hortalizas de amplio consumo, como por ejemplo, el jitomate.

Cuadro No 3.- Composición media de *Capsicum spp.*  
(Ref. Nuez, Ortega, 1996)

COMPOSICIÓN	
MATERIA SECA	34.6 %
AGUA	65.4 %
ENERGÍA	116.0 kcal
PROTEÍNA	6.3 %
FIBRA	15 %
CALCIO	86.0 mg
HIERRO	3.60 mg
CAROTENOS	6.6 mg
TIAMINA	0.37 mg
RIBOFLAVINA	0.51 mg
NIACINA	2.50 mg
VITAMINA C	96.0 mg

El contenido del chile de vitamina A es elevado, estimándose que con 3-4 gramos de chile se cubren los requerimientos diarios de vitamina A de una persona adulta. En el chile la vitamina A no se encuentra en formas directamente utilizables, sino que está en forma de provitaminas, las cuales son transformadas en vitamina A en el hígado de los humanos y los animales. Estas provitaminas son el  $\alpha$  y  $\beta$  caroteno y la criptoxantina. De las tres, la más importante es el  $\beta$  caroteno, porque se encuentra en mayor proporción y porque de cada molécula se obtienen dos de vitamina A, mientras que las otras dos provitaminas solo proporcionan una molécula de vitamina A por molécula.

También destaca el alto contenido de vitamina C en el chile (entre 70 y 300 mg/100 g de peso fresco), aunque hay diferencias grandes entre variedades, ya que las variedades de color verde generalmente contienen más vitamina C que las de color amarillo o rojo (que por su parte pudieran ser más ricas en provitamina A). por otro lado cabe resaltar que el contenido de vitamina C se ve afectado por varios factores de tipo agronómico como son: cultivo realizado al aire libre o en invernadero, marco de plantación, riego, estado de madurez del fruto, etc.

En el chile, la mayor parte de los azúcares sencillos están representados por la glucosa (90-98%), siendo el resto sacarosa. La pectina es otro carbohidrato importante y está presente en un 3-7% aproximadamente. Por otra parte, el contenido en fibra del chile es de aproximadamente de el 20-24% de la materia seca.

Además de los componentes citados anteriormente, en el chile se encuentran aceites volátiles, lípidos, aminoácidos, proteínas (de alto valor biológico), ácidos orgánicos y sustancias minerales.

Otro aspecto a considerar es el contenido de agua. En las variedades dulce o pimientos, la proporción de agua varía de un 82-92%, mientras que en las variedades picantes se encuentra en torno a un 65 %.

La capsaicina es el principio picante del chile, el cuál se encuentra ausente en las variedades "dulces". Es una sustancia de naturaleza alcaloide. Concretamente, se trata de un protoalcaloide, cuya fórmula empírica es  $C_{18}H_{27}O_3N$ , siendo un producto de condensación del ácido decilénico y de la 3-hidroxi-4-metoxi benzilamida. En la actualidad se sabe que la capsaicina no es un compuesto simple, sino que se trata de una mezcla de varias amidas, que son comúnmente conocidas con el nombre de capsaicinoides, siendo la capsaicina el más importante entre ellas. La fórmula estructural de los capsaicinoides se muestra a continuación.

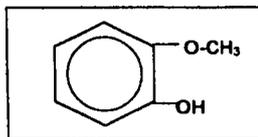


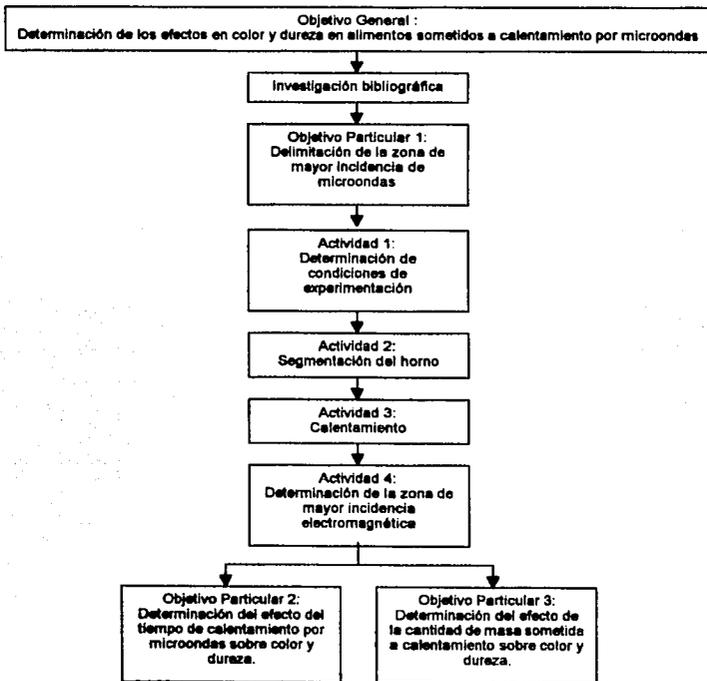
Fig.6.1.- Fórmula estructural de los capsaicinoides

El contenido medio de capsaicina en el chile se encuentra repartido aproximadamente de la siguiente manera: en el fruto es de 0.6%, en las semillas de un 0.7% y en el pericarpio de un 0.03%. Asimismo, el contenido de capsaicina dependerá de la variedad y de los cambios de los factores ambientales básicos. La formación de capsaicinas es mayor a temperaturas elevadas (en torno a los 30 °C) que a temperaturas menos drásticas (21-24°C) (Messiaen, 1979).

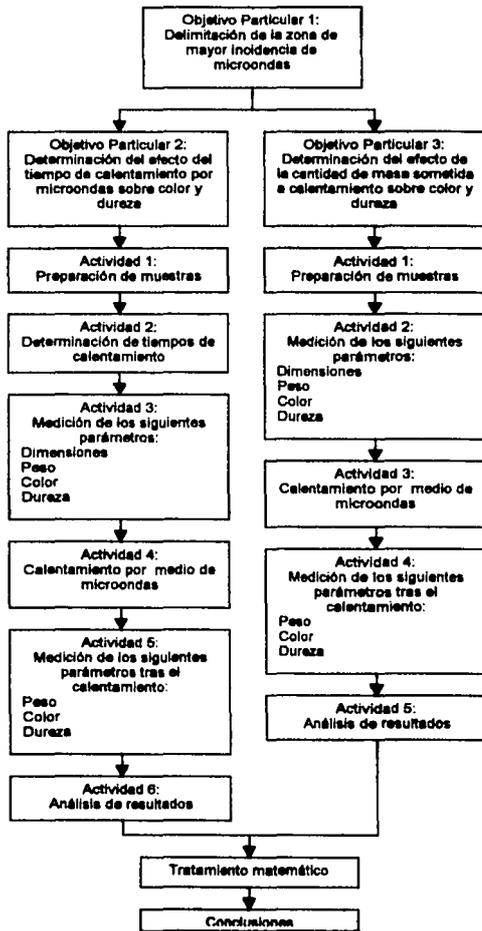
## CAPITULO SIETE

### DISEÑO EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

#### 7.1.- CUADRO METODOLOGICO



Cuadro metodológico (continuación)



## 7.2.- DISEÑO EXPERIMENTAL

Para la realización del presente trabajo de investigación se propone la línea experimental descrita a continuación. El diseño experimental, de acuerdo al cuadro metodológico presentado anteriormente, constó de tres etapas, siendo la primera de ellas el punto de partida para las dos etapas complementarias restantes. Es en la etapa inicial en donde se llevó a cabo la caracterización del horno de microondas a emplear, con el propósito de establecer el punto de mayor incidencia electromagnética dentro del mismo y determinar así la zona en donde deberían ser ubicadas las muestras durante la experimentación (Objetivo Particular 1), asegurándonos así, de que estos recibirían la mayor cantidad de radiaciones electromagnéticas posible. Esta fase experimental se subdividió, a su vez, en 4 actividades.

En las etapas posteriores, tanto las zanahorias, las papas y los chiles fueron expuestos a la acción de un campo electromagnético constante. Las variables involucradas en el proceso de calentamiento fueron, para estas etapas, el tiempo de exposición y la cantidad de masa sometida a calentamiento (variables independientes) y las variaciones en color y la pérdida de dureza (variables dependientes), de acuerdo a los objetivos particulares 2 y 3 establecidos al principio de este trabajo, para cuya cobertura se asignaron 6 y 5 actividades, respectivamente.

**Objetivo 1.- Delimitación de la zona de mayor incidencia de microondas**

Justificación

Debido a que las ondas electromagnéticas son emitidas dentro del horno en los tres planos dimensionales (superior-inferior, anterior-posterior e izquierda-derecha), es razonable suponer que en algunas zonas se presente un mayor calentamiento que en otras. Para llevar a cabo la caracterización del horno se empleó agua destilada, por considerarse un elemento de relativa pureza.

### **Hipótesis nula**

**El calor absorbido es el mismo en todas las zonas**

### **Hipótesis alterna**

**La cantidad de calor absorbido dependerá de la zona en que se lleve a cabo el mismo.**

### **Materiales**

**-Horno de microondas General Electric modelo MH1400K002(Mabe Hot Point Dual Wave III) con las siguientes características:**

**120 volts (60Hz)**

**1.35 kwatts**

**1400 MHz;**

**-Vaso de precipitados de 500 ml;**

**-Termopar para horno de microondas;**

**-Cronómetro;**

**-Agua destilada.**

### **Metodología**

**La base del interior del horno se seccionó en 9 partes iguales (tal como se muestra en la siguiente figura), tras lo cual se sometieron a calentamiento 500 ml de agua en todas y cada una de dichas zonas, calculando tras ello el tiempo en que fue alcanzada una temperatura previamente establecida, así como la cantidad de calor que fue transmitido al líquido.**

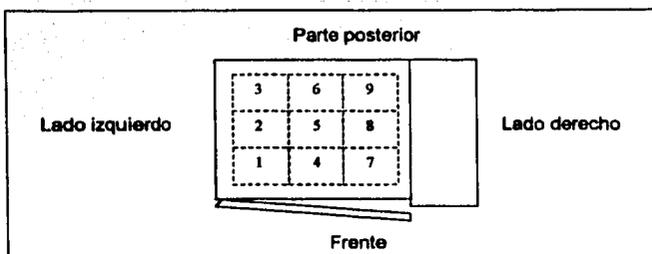


Fig. 7.1.- Zonas en que fué seccionado el horno de microondas (vista superior)

Este experimento debió ser llevado a cabo en dos fases. La primera de ellas destinada a determinar el tiempo en que el agua alcanzaría una temperatura de 70°C. Para ello se colocó el termopar para horno de microondas dentro del vaso de precipitados con 500 ml de agua destilada (teniendo siempre en consideración que el termopar siempre ocupara la misma posición, en el centro del recipiente). El horno se programó para alcanzar la temperatura antes definida y el tiempo en que esta fue alcanzada se cronometró. La prueba se realizó por triplicado para cada una de las zonas definidas.

La segunda parte de la caracterización del horno tuvo como objetivo el determinar la cantidad de calor que 500 ml de agua absorbieron tras un tiempo de exposición de 3 minutos en todas y cada una de las zonas delimitadas y que, junto con el tiempo antes calculado, nos permitirían establecer la zona en que deberían ubicarse los objetos de estudio a lo largo de la experimentación. Para ello, se introdujo un vaso de precipitados con 500 ml de agua destilada en el interior del horno, registrando su temperatura inicial. Tras el calentamiento se registró, inmediatamente, la temperatura alcanzada por la muestra.

Con los datos obtenidos se calculó la cantidad calor absorbida por cada región de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_0 = m C_p \Delta T$$

(17)

en donde

$Q_0$  = cantidad de calor absorbida [kcal]

$m$  = masa del agua [Kg];

$C_p$  = es la capacidad calorífica del agua [Kcal/Kg°C];

$\Delta T$  = ( $T_{FINAL} - T_{INICIAL}$ ) = diferencia de temperaturas [°C];

En todos los casos, cada evento se llevó a cabo por triplicado.

Los datos obtenidos se tabularon en el siguiente cuadro y se realizó un análisis estadístico, en donde se calcularon promedio, desviación estándar y coeficiente de variación.

Zona	$Q_0$ absorbido en 3 minutos [Kcal]	Tiempo en que se alcanzaron 70°C [s]
1		
2		
.		
.		
n		

Objetivo 2.- Determinación del efecto del tiempo de calentamiento por microondas sobre color y dureza

Objetivo 3.- Determinación del efecto de la cantidad de masa sometida a calentamiento sobre color y dureza

(La justificación, así como la metodología de los objetivos 2 y 3 de este trabajo se resumen conjuntamente debido a la similitud de las mismas).

#### Justificación

La dureza y el color son dos de los parámetros más importantes a considerar dentro de las características cualitativas de los alimentos, ya que juegan un papel determinante en la aceptación de estos por parte de los consumidores.

#### Materiales

-Horno de microondas General Electric modelo MH1400K002(Mabe Hot Point Dual Wave III) con las siguientes características:

120 volts (60Hz)

1.35 kwatts

1400 MHz;

-Balanza analítica

-Colorímetro Minolta CR-300

-Texturómetro Texture Analyzer TA-XT2

-Vernier

-Termopar para horno de microondas;

-Papa blanca o irlandesa (*Solanum tuberosum*)

-Zanahoria Chatenay (*Daucus carota*)

-Chile Jalapeño (*Capsicum spp.*)

#### Metodología

##### Preparación de las muestras

Para la realización de cualquier prueba, ya sea preliminar o definitiva, las muestras se sometieron a un período de atemperado (en bolsas cerradas de plástico) de, al menos, 24 horas anteriores a las mismas, a temperatura ambiente, tras haber sido lavadas, secadas e identificadas, evitando así posibles errores en las lecturas de color y dureza debidas a la contaminación por cualquier materia extraña y al exceso de humedad que

podiera retenerse en un lavado inmediatamente anterior a la prueba. El color (en coordenadas L, a, b), así como la dureza de las muestras se evaluaron en dos puntos distintos antes de someter las muestras a calentamiento (ver páginas. 83 y 84).

#### Determinación de los períodos de calentamiento

Antes de llevar a cabo las pruebas destinadas a la evaluación del efecto de las microondas sobre el color y la dureza, fue necesario determinar los tiempos en los que la zanahoria, papa y chile serían expuestos a la acción de las microondas (actividad 2, objetivo particular 2). Esto se llevó a cabo colocando en la zona elegida de la base del horno (según metodología expuesta párrafos arriba), el equivalente a la menor cantidad de masa a someter a calentamiento, que en todos los casos fue de una pieza. Los tiempos de calentamiento se establecieron con base en el efecto que este ejerció sobre cada una de las muestras, es decir, el tiempo máximo de calentamiento fue aquel en el que la estructura de la muestra no presentó un daño tal, que pudiera haber supuesto algún problema en la medición de color y/o dureza, mientras que el tiempo mínimo fue aquel en el que se presentó un mínimo efecto sobre las muestras. Estos tiempos, una vez definidos, se emplearon a lo largo de toda la experimentación aún para las diferentes cantidades de masa a calentar establecidas (equivalentes, en este caso, al doble y triple de la considerada originalmente para todas las verduras).

Una vez hecho lo anterior, en todos los casos se sometió a las verduras a calentamiento por microondas (por separado) variando, en primer lugar, los tiempos de calentamiento de acuerdo a un perfil de tiempo establecido de acuerdo a lo señalado párrafos arriba, tras lo cual las verduras nuevamente debieron ser pesadas y su color (coordenadas L, a, b), y dureza, evaluados, nuevamente, en dos puntos distintos, determinando así las pérdidas de dureza y color sufridas tras el proceso.

Las pruebas de dureza se realizaron a través del texturómetro Texture Analyzer TA-XT2, antes mencionado, y una vez calibrado, se trabajó bajo las siguientes operaciones de trabajo:

Velocidad de la prueba:	0.5 mm/s
Distancia de penetración:	2.0 mm.
Altura del brazo.	250 mm.
Capacidad de la celda de carga:	10 Kgf
Geometría:	Cono de acero con ángulo de penetración de 30°
Peso del cono:	100 g.

En esta etapa experimental, las variables a controlar se definieron de la siguiente manera:

**Variables independientes:** Tiempo de calentamiento

(4 niveles de variación en todos los casos)

Cantidad de masa sometida a calentamiento

(3 niveles de variación en todos los casos)

**Variables dependientes:** Color (coordenadas L, a, b)

Dureza

**Variables de respuesta:** Pérdidas de dureza

Variación de color

Por otra parte, se llevó a cabo el mismo proceso de calentamiento y medición, variando ahora la cantidad de masa sometida a calentamiento en cada uno de los tiempos establecidos, de tal manera que las cantidades a calentar fueron una cantidad mínima, el doble y el triple de ésta, respectivamente, en cada corrida, las cuales se llevaron a cabo por triplicado.

Los puntos en donde se llevaron a cabo las mediciones de dureza y color, se muestran, para cada tipo de muestra, en los siguientes cuadros:

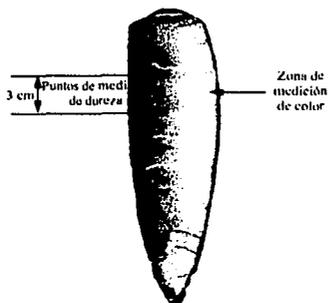


Fig. 7.2.- Zonas de medición en zanahoria



Fig. 7.3.- Zonas de medición en papa

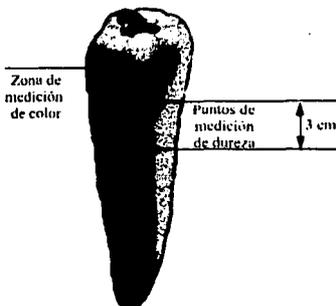


Fig. 7.4.- Zonas de medición en chile

Los datos obtenidos fueron registrados en la siguiente tabla.

ANTES DE CALENTAMIENTO					DESPUES DE CALIENTAMIENTO						
MASA	L	a	b	DUREZA (gr)	TIEMPO DE CALENTAMIENTO (s)	L	a	b	DUREZA (gr)	$\Delta E$ (adm)	PÉRDIDA DE DUREZA (%)

El cálculo de la media, la desviación estándar y coeficiente de variación para cada grupo de datos obtenidos, fue la base del estudio estadístico que se llevó a cabo.

Si el coeficiente de variación presentara un valor superior al 10%, se realizaría la prueba de Tukey para determinar la similitud estadística de los datos.

## CAPITULO OCHO

### ANALISIS DE RESULTADOS

#### 8.1.-CARACTERIZACIÓN DEL HORNO DE MICROONDAS

##### 8.1.1.-Determinación de la zona de mayor incidencia electromagnética

Los promedios del cálculo de las cantidades de calor obtenidas a partir de los resultados arrojados en esta etapa experimental, así como los tiempos de calentamiento obtenidos para cada zona, se resumen a continuación:

Cuadro No. 4.- Valores promedio obtenidos de  $Q_0$  y tiempo

Zona	$Q_0$ absorbido en 3 minutos [Kcal]	Tiempo en que se alcanzaron 70°C [s].
1	28.08	117.00
2	23.58	78.00
3	21.06	152.00
4	22.50	134.00
5	22.50	152.00
6	23.04	147.00
7	21.42	141.00
8	21.06	152.00
9	21.42	195.00
Promedio	22.47	140.88
Desv. est	2.19	31.44
CV (%)	9.85	22.31

Al calcular los coeficientes de variación a partir de los datos del cuadro anterior para  $Q_0$  y el tiempo en que el agua alcanzó los  $70^{\circ}\text{C}$  (9.65% y 22.31% respectivamente), queda confirmada la validez de la hipótesis alterna.

De acuerdo a lo anterior, si agrupáramos las 9 zonas en que se dividió la base del horno en tres regiones paralelas (fig. 7.1), los menores tiempos de calentamiento, así como la mayor transferencia de calor, tuvieron lugar en las tres primeras zonas (1, 2 y 3), aunque con una notoria variación. Caso contrario se observa en las zonas 4, 5 y 6 (zona central del horno) en donde se registran tiempos y cantidades de calor transferido con un menor margen de variación. En las zonas restantes, es decir, 7, 8 y 9, las cantidades de calor obtenidas son de las más bajas de entre las obtenidas en todo el sistema, aunque con una notable uniformidad. En cuanto a los tiempos de calentamiento, estas tres zonas presentaron los más altos registros en el sistema.

Debido a lo anterior, se ha seleccionado a la zona número 6 como la zona en que se llevaría a cabo el resto de la experimentación, ya que ésta, al encontrarse en la región central del horno, considerada como la región de mayor incidencia electromagnética y una menor variación en los tiempos de calentamiento, registró una mayor cantidad de calor transferido en un tiempo cercano a la media del total de los registrados. Cabe mencionar que, si bien la zona 6 no es la región en que se registró la mayor incidencia de microondas y/o el menor tiempo de calentamiento, sí pertenece a la región en que se ha encontrado la mayor uniformidad dentro del sistema.

## **8.2.- DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE DUREZA Y VARIACIÓN DE COLOR.**

### **8.2.1.-Determinación de los tiempos de calentamiento**

Los tiempos mínimos y máximos que se establecieron para los diferentes alimentos con los que se experimentó, se resume en el siguiente cuadro:

**Cuadro No.5.- Tiempos máximos y mínimos de calentamiento**

ALIMENTO	TIEMPO MÍNIMO [s]	TIEMPO MÁXIMO [s]
ZANAHORIA	60	150
PAPA	60	150
CHILE	10	25

Los niveles de variación que se determinaron una vez establecidos los límites inferior y superior, fueron los siguientes:

- Para zanahoria y papa, se determinó emplear intervalos de 30 segundos, con los que los niveles de variación empleados fueron de 60, 90, 120 y 150 segundos (1:00, 1:30, 2:00 y 2:30 minutos, respectivamente)
- Para el chile, los niveles de variación empleados fueron de 10, 15, 20 y 25 segundos.

En todos los casos, los tiempos máximos fueron definidos en función del daño que el calentamiento provocó en las muestras, ya que al sobrepasar estos máximos, las muestras comenzaron a mostrar superficies lo suficientemente rugosas y suaves, como para suponer que esto representaría algún problema en las mediciones de color y dureza.

#### **8.2.2.- Pérdida de dureza y variación de color en zanahoria**

Los resultados obtenidos en las dos etapas experimentales definidas anteriormente para determinar el efecto, por un lado, del tiempo de calentamiento, así como el de la cantidad de masa sometida a calentamiento, sobre la pérdida de dureza y la variación de color, en todos los casos, se presentarán conjuntamente aún cuando el diseño experimental contemple actividades independientes para cada caso.

De esta manera, los valores promedio de los resultados obtenidos para zanahoria, tanto al principio, como al final de la prueba, se resumen en el siguiente cuadro:

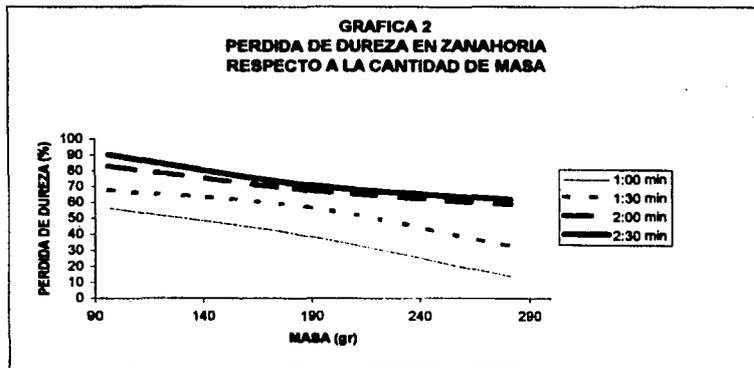
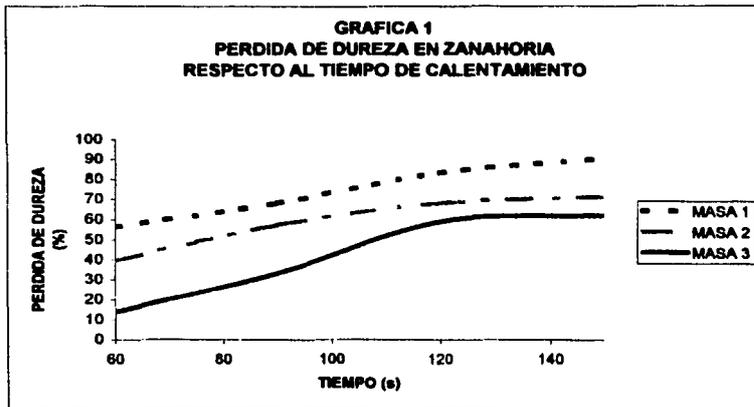
Cuadro No. 6.- Resultados obtenidos en zanahoria

MASA	ZANAHORIA ANTES DE CALENTAMIENTO					TIEMPO DE CALENTAMIENTO [s]	ZANAHORIA DESPUES DE CALENTAMIENTO				
	L	a	b	DUREZA [grf]			L	a	b	DUREZA [grf]	$\Delta E$ [adim]
1 (95.92g)	46.54	16.93	18.49	882.76	60.00	63.22	1.51	9.79	384.82	24.33	56.41
	47.62	16.71	18.23	937.02	90.00	59.35	7.85	14.15	301.32	15.26	67.84
	46.26	14.92	17.41	852.82	120.00	61.75	8.62	11.58	144.10	17.71	83.10
	46.87	17.57	18.88	898.29	150.00	62.13	8.84	14.78	68.13	18.06	90.19
2 (187.44g)	48.96	15.96	17.62	813.25	60.00	65.61	0.43	14.62	493.03	22.95	39.38
	42.81	14.60	16.00	836.22	90.00	62.13	9.43	12.29	356.44	20.34	57.37
	45.57	14.48	16.99	865.33	120.00	61.62	6.50	8.27	277.18	19.93	67.97
	46.55	15.25	17.78	850.33	150.00	62.96	8.94	12.72	245.50	18.29	71.13
3 (281.20g)	51.42	-71.17	21.77	822.17	60.00	65.26	11.62	10.29	708.08	64.72	13.88
	47.91	-67.85	21.51	958.54	90.00	61.85	8.30	14.95	641.56	77.50	33.07
	46.33	-66.81	22.10	815.11	120.00	59.02	5.76	13.59	335.77	73.97	56.81
	45.01	-65.36	22.11	862.49	150.00	64.23	8.13	5.54	327.64	77.74	62.01

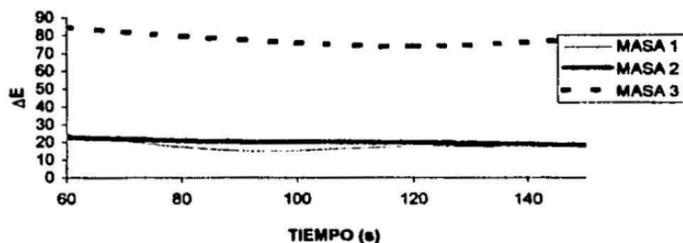
Los coeficientes de variación obtenidos para cada grupo de datos fueron, casi en su totalidad, superiores al 10%, por lo que, y de acuerdo con lo propuesto en el cuadro metodológico, dichos resultados fueron sometidos a la prueba de Tukey, con la finalidad de determinar si existían diferencias significativas, estadísticamente hablando, entre los mismos. Las observaciones que la prueba de Tukey arrojó se detallan a continuación:

- en el caso de las coordenadas de color (L, a, b), no se encontró diferencia significativa alguna entre los datos obtenidos a partir de la materia prima cruda. Esta observación adquiere una relevante importancia, ya que el color se ha establecido como referencia del grado de madurez de las muestras, con lo que se confirma la homogeneidad de la población muestral. En cuanto al color de las muestras sometidas a calentamiento, tampoco se encontró ninguna diferencia significativa.
- en cuanto a la dureza de las muestras, tanto en las muestras crudas como en las sometidas a calentamiento, existen diferencias significativas, sin excepción, para todos los casos.

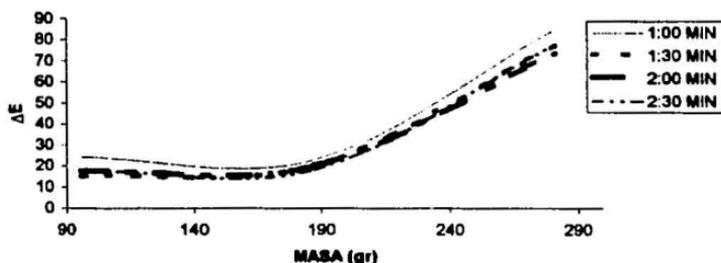
Las gráficas que ilustran los anteriores resultados se presentan a continuación:



**GRAFICA 3**  
**VARIACION DE COLOR EN ZANAHORIA**  
**RESPECTO AL TIEMPO DE CALENTAMIENTO**  
 (expresado como  $\Delta E$ )



**GRAFICA 4**  
**VARIACION DE COLOR EN ZANAHORIA**  
**RESPECTO A LA CANTIDAD DE MASA**  
 (expresado como  $\Delta E$ )



De acuerdo a la gráfica número 1, en los tres niveles de variación se observa prácticamente el mismo comportamiento, acusando una mayor pérdida de dureza

conforme la cantidad de masa disminuye y el tiempo de exposición aumenta. En esta misma gráfica observamos que en masa 2 y masa 3, hacia el final del proceso, parece haberse alcanzado un punto en el que el efecto alcanza un máximo, tras el cual cabría suponer que no se presentaría ningún cambio, en cuanto a dureza se refiere. Los datos referentes a masa 1, dadas sus diferencias estadísticas, no son suficientes como para establecer si este punto se alcanzó antes o no.

Esto es debido, muy probablemente, a que tras un cierto período de exposición, las muestras pudieran alcanzar un máximo en cuanto a su capacidad de absorción de energía, es decir, tras un cierto período de exposición continuo a un campo electromagnético, se llegará a un punto en que las zanahorias ya no podrán absorber una mayor cantidad de la energía electromagnética disponible en el medio y como consecuencia de ello, no sufrirán un mayor cambio en su dureza. El hecho de que tras un aumento en la temperatura las propiedades dieléctricas de un alimento se ven mermadas, con una consiguiente reducción en la eficiencia con que reaccionan a la exposición a un campo electromagnético, pudiera apoyar este razonamiento.

La gráfica número 2 muestra una notable congruencia respecto a la gráfica 1 en este sentido. A los mayores tiempos de exposición (2:00 y 2:30 minutos), la dinámica de pérdida de dureza alcanza una notable similitud, no sólo en cuanto a comportamiento, sino en cuanto a los valores puntuales alcanzados, especialmente hacia el final del proceso.

En cuanto a las gráficas 3 y 4, éstas muestran que no hay efecto significativo alguno sobre las muestras a lo largo del proceso, ya que el color (expresado como  $\Delta E$ ) permanece inmutable a lo largo del mismo.

Desde el punto de vista de dureza, las zanahorias sometidas a las condiciones más drásticas (menor masa y los 2 mayores tiempos), fueron las que mostraron una mayor degradación, ya que al formarse una mayor cantidad de vapor en su interior, como resultado de la evaporación del agua contenida dentro de sus células, se registraron una serie de expulsiones violentas del mismo, como consecuencia del aumento de presión, lo que les confirió a las muestras un aspecto desagradable. En lo

que respecta a los dos primeros tiempos con masa 1 y a la totalidad de los experimentos con masa 2 y masa 3, todos, se obtuvieron productos organolépticamente aceptables, cuyo único "daño" que se registró, en diferente medida, fue la ligera resequedad en la superficie, debido al fenómeno de evaporación superficial.

### 8.2.3.- Pérdida de dureza y variación de color en papa

Los datos arrojados en la experimentación con papas son mostrados en el cuadro siguiente:

Cuadro No. 7.- Resultados obtenidos en papa

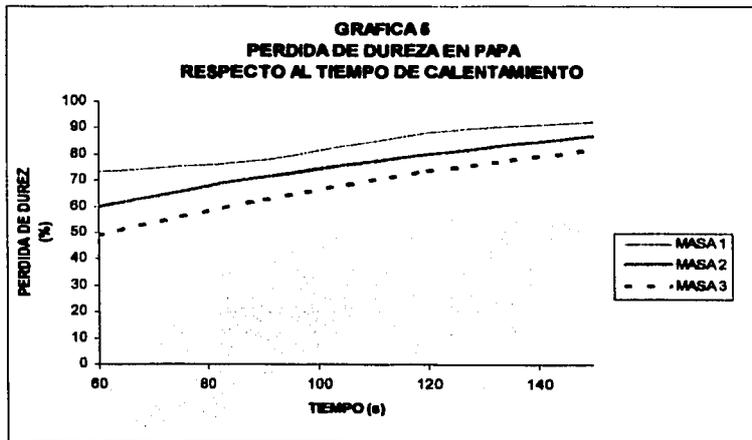
PAPA ANTES DE CALENTAMIENTO					PAPA DESPUÉS DE CALENTAMIENTO						
MASA	L	a	b	DUREZA (grf)	TIEMPO DE CALENTAMIENTO	L	a	b	DUREZA (grf)	D E (edim)	PÉRDIDA DE DUREZA (%)
					(e)						
1 (47.32g)	85.32	1.24	6.04	592.68	60.00	124.97	1.36	6.41	157.43	39.65	73.45
	83.87	2.09	7.05	551.63	90.00	109.17	2.42	7.45	121.37	25.31	78.00
	84.59	0.91	8.14	589.77	120.00	82.42	0.44	5.56	70.22	3.41	88.09
	84.81	0.61	9.10	640.13	150.00	70.38	1.66	6.60	50.65	14.49	92.09
2 (84.11g)	83.31	0.29	7.60	566.48	60.00	82.72	0.52	6.24	226.68	1.50	59.77
	83.68	0.40	6.66	543.95	90.00	94.57	0.17	7.96	156.16	10.97	71.29
	82.02	0.36	6.36	556.01	120.00	82.39	1.99	6.23	112.94	2.70	79.78
	85.65	0.04	9.06	571.48	150.00	78.49	1.08	5.37	74.68	6.12	86.90
3 (124.07g)	84.07	1.91	9.16	574.99	60.00	79.55	-3.42	6.43	291.05	7.50	49.36
	81.40	1.00	9.49	588.80	90.00	88.29	-0.36	6.49	216.65	13.22	62.61
	81.53	2.16	8.24	566.69	120.00	69.52	-0.19	9.10	148.77	12.27	73.75
	93.79	2.09	9.05	562.27	150.00	69.80	-0.35	9.02	100.71	24.12	81.77

La prueba de Tukey aplicada al anterior grupo de datos arrojó las siguientes observaciones:

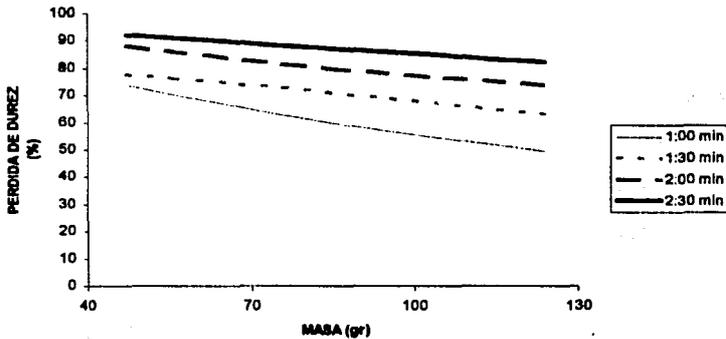
- En el caso de las coordenadas de color (que como anteriormente se indicó se tomarían como indicador del grado de madurez de las muestras), se encontró que no existe diferencia significativa alguna en las mismas en las muestras crudas. Contrariamente, al final de los experimentos, en todos los casos se encontró que existe diferencia significativa entre todos los grupos de datos de color.

- Respecto a la los datos de dureza, tanto en las muestras crudas como en las sometidas a calentamiento, se detectaron diferencias significativas en todos los casos.

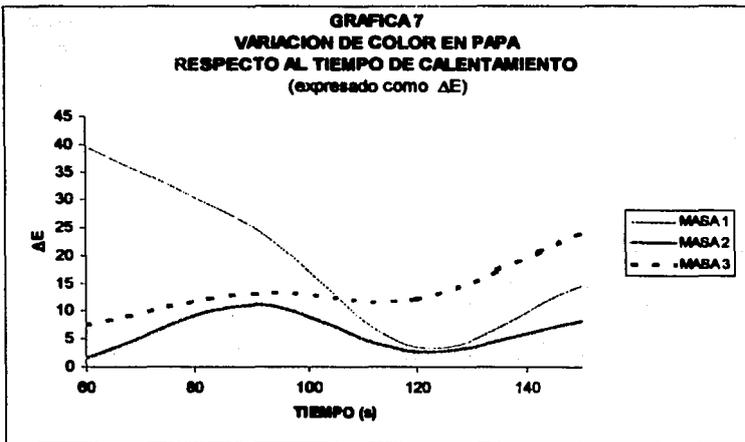
Las gráficas expuestas a continuación muestran el comportamiento de las muestras estudiadas durante la experimentación:



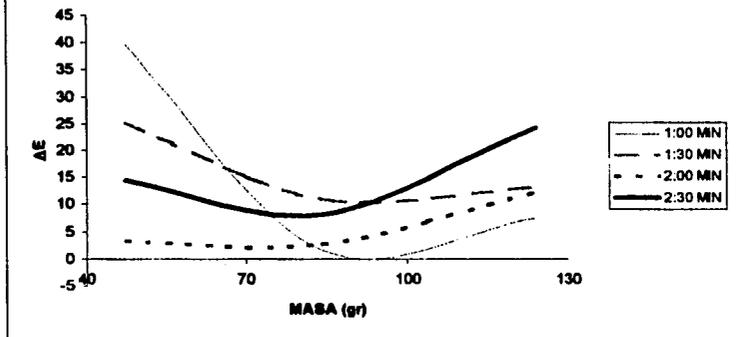
**GRAFICA 6**  
**PERDIDA DE DUREZA EN PAPA**  
**RESPECTO A LA CANTIDAD DE MASA**



**GRAFICA 7**  
**VARIACION DE COLOR EN PAPA**  
**RESPECTO AL TIEMPO DE CALENTAMIENTO**  
 (expresado como  $\Delta E$ )



**GRAFICA 8**  
**VARIACION DE COLOR EN PAPA**  
**RESPECTO A LA CANTIDAD DE MASA**  
 (expresado como  $\Delta E$ )



Aun cuando los datos de dureza presentan diferencias significativas, tanto al inicio como a lo largo del proceso, las gráficas 5 y 6 muestran un comportamiento bastante homogéneo, y una tendencia constante a lo largo del experimento, lo que nos permitirá hacer algunas conjeturas al respecto.

Al igual que en las zanahorias, en todos los casos se observa una misma tendencia, es decir, la pérdida de dureza se acrecenta conforme transcurre el tiempo de exposición y disminuye, a su vez, conforme aumenta la cantidad de masa expuesta, sin embargo, y a diferencia de las zanahorias, al menos en cuanto se refiere al tiempo comprendido en la experimentación, en las papas no se observa alguna región en donde la pérdida de dureza parezca estabilizarse. Esto pudiera explicarse en función de un mayor contenido de almidón, el cual, al aumentar su temperatura, comienza a absorber agua presente en las zonas intermicelares, reteniéndose una mayor cantidad de agua (proceso de gelatinización), lo que retardaría la formación de una cantidad relativamente alta de vapor en el interior de las mismas y éste no sería expulsado

violentemente causando un gran daño en la dureza de las muestras, con lo que las papas conservarían una mejor dureza al final del proceso.

Por otro lado, el estudio de las gráficas 7 y 8 nos indica que, tras un inicio bastante irregular, en general el color decrece desde el inicio y hasta un poco más allá de la parte media del experimento, período tras el cual se observa una creciente variación de color, es decir, la cinética de variación de color en papas sometidas a calentamiento por microondas presenta 2 etapas. En la primera de ellas, conforme transcurre el tiempo y aumenta la cantidad de masa expuesta a calentamiento, en general, se observa una tendencia hacia cierta "estabilidad". Esto se puede observar de mejor manera en la gráfica 7, en donde, para la mayor masa (3), parece haberse alcanzado un período de estabilidad (entre los 90 y 120 segundos), y es apenas sugerido para la masa 2 e inexistente en masa 1. en la segunda etapa, invariablemente, tras superar la barrera de los 2 minutos de calentamiento, se observa un incremento en la variación de color. Este repentino incremento pudiera deberse, en parte, a que en las últimas etapas de la experimentación las muestras comenzaban a presentar grietas en su superficie, lo que seguramente ocasionó que las lecturas del colorímetro perdieran precisión.

El aspecto de las papas calentadas por medio de microondas, en general, es bueno, aunque, como ya se mencionó, en el último tiempo de calentamiento (2:30 minutos), los productos obtenidos comenzaron a presentar pequeñas grietas en su superficie, que si bien, no les confirió un mal aspecto, en absoluto, si pudieran haber representado un problema serio en el momento de la evaluación de color, ya que, como el colorímetro precisa de superficies lisas para su correcto funcionamiento, estas irregularidades muy probablemente influyeron en las lecturas que se obtuvieron y que en las gráficas 7 y 8 se observan como repentinos cambios en las pendientes de las curvas obtenidas en la última parte de las mismas.

### 8.2.4.- Pérdida de dureza y variación de color en chile jalapeño

Los resultados que las pruebas realizadas sobre chiles jalapeños arrojaron se resumen en el siguiente cuadro:

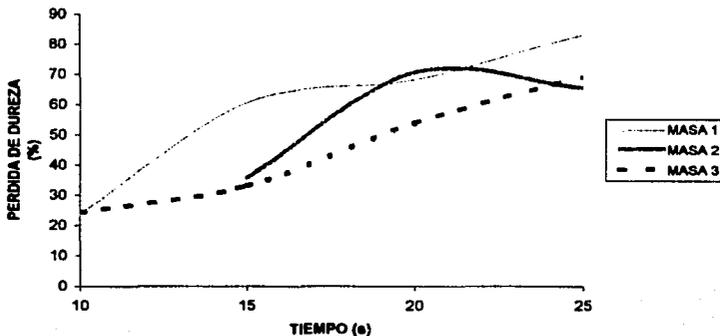
Cuadro No. 8.- Resultados obtenidos en chile

MASA	CHILE ANTES DE CALENTAMIENTO					CHILE DESPUES DE CALENTAMIENTO					PÉRDIDA DE DUREZA (%)
	L	a	b	DUREZA [grf]	TIEMPO DE CALENTAMIENTO [s]	L	a	b	DUREZA [grf]	Δ E [edim]	
1 (18.23g)	33.73	-5.99	6.91	288.33	10.00	33.63	-3.93	4.97	219.35	2.83	23.92
	34.14	-6.01	7.19	327.53	15.00	34.25	-4.77	5.42	129.12	2.16	60.58
	32.53	-7.82	4.26	367.15	20.00	34.54	-5.18	5.17	117.13	3.29	68.10
	34.09	-6.31	7.34	349.93	25.00	36.48	-7.24	7.59	59.82	2.58	82.91
2 (36.44g)	33.75	-5.88	7.83	346.77	10.00	35.56	-6.21	7.06	492.83	1.99	
	34.04	-6.29	7.32	262.65	15.00	34.59	-5.48	6.16	168.51	1.52	35.84
	33.88	-6.30	7.27	347.63	20.00	37.17	-7.00	7.63	120.34	3.38	65.38
	33.73	-6.64	7.13	337.24	25.00	35.44	-11.80	5.07	99.43	5.80	70.52
3 (48.53g)	31.94	-7.02	7.41	292.01	10.00	32.33	-4.73	5.48	221.01	3.02	24.31
	32.06	-6.69	7.09	322.66	15.00	33.80	-5.10	5.84	215.87	2.66	33.10
	32.36	-6.79	7.46	296.29	20.00	35.68	-4.49	5.45	137.06	4.51	53.74
	31.49	-6.18	6.43	327.27	25.00	34.59	-4.86	5.22	101.39	3.58	69.02

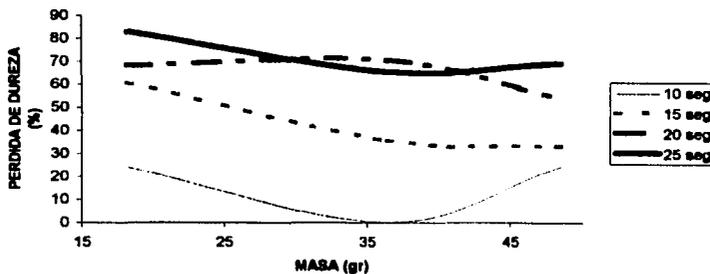
La prueba de Tukey nos indica que, en cuanto a color se refiere, no existen diferencias significativas al inicio, en las muestras crudas, ni en los chiles sometidos a calentamiento. De nueva cuenta, esto adquiere relevancia por considerarse al color como indicador de la madurez del producto.

La prueba de Tukey nos ha permitido corroborar, una vez más, las diferencias significativas presentes entre todos los grupos de datos obtenidos de dureza, y es en este producto, en donde dichas diferencias significativas han dificultado más el establecer con precisión un comportamiento claro a lo largo del proceso de calentamiento, tal y como lo indican las siguientes gráficas:

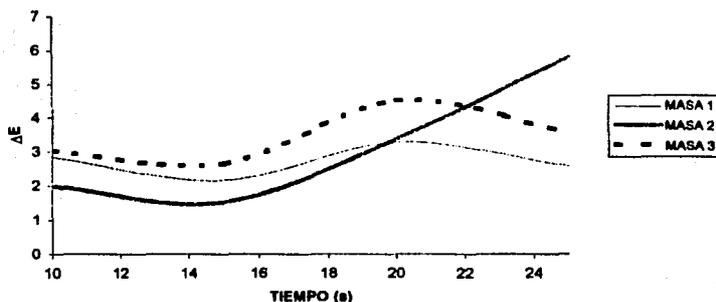
**GRAFICA 9**  
**PERDIDA DE DUREZA EN CHILE**  
**RESPECTO AL TIEMPO DE CALENTAMIENTO**



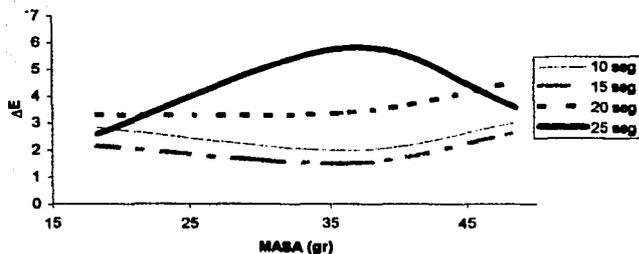
**GRAFICA 10**  
**PERDIDA DE DUREZA EN CHILE**  
**RESPECTO A LA CANTIDAD DE MASA**



**GRAFICA 11**  
**VARIACION DE COLOR EN CHILE**  
**RESPECTO AL TIEMPO DE CALENTAMIENTO**  
 (expresado como  $\Delta E$ )



**GRAFICA 12**  
**VARIACION DE COLOR EN CHILE**  
**RESPECTO A LA CANTIDAD DE MASA**  
 (expresado como  $\Delta E$ )



Refiriéndonos a dureza (gráficas 9 y 10), podemos observar que el chile presenta básicamente el mismo comportamiento que en los casos anteriores, es decir, de manera análoga a la zanahoria y a la papa, el efecto de las microondas sobre la dureza del chile se acrecenta cuando el tiempo de exposición aumenta, y aunque de manera menos acusada, la masa ejerce un efecto de "amortiguador", es decir, a un mismo tiempo de exposición, una mayor cantidad de masa expuesta sufrirá un menor deterioro en su dureza.

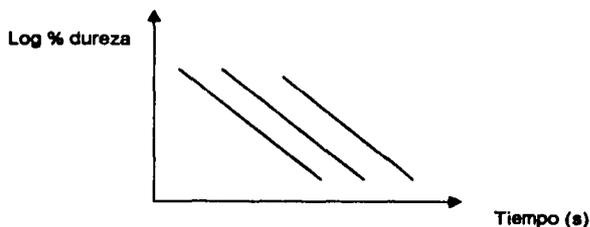
En cuanto al color de los chiles, las gráficas 11 y 12 nos permiten constatar que es en este producto en donde se ha observado una de las más pequeñas variaciones. Y es aquí en donde los experimentos realizados pudieran encontrar una aplicación, al menos, que valdría la pena complementar con algún otro tipo de investigación, ya que físicamente, el color de los chiles, tras someterse a un calentamiento por medio de microondas no muestra diferencias notables respecto al color presentado originalmente por las muestras, y es que, al no existir agua en el medio de calentamiento, las reacciones de deterioro de color que se llevan a cabo en un medio acuoso al calentar algún alimento con un alto contenido de clorofilas no se llevan a cabo y el color de los chiles resulta mayormente atractivo, ya que en lugar del característico color verde olivo adquirido por la degradación de la clorofila en un medio acuoso, los chiles conservan ese atractivo color verde brillante, debido a la eliminación de aire intercelular, como producto del calentamiento, por lo que el tejido muestra una mayor transparencia. Esto se ve reflejado en un pequeño, pero notable aumento en la luminosidad del producto (L).

Desde el punto de vista textural, los chiles Jalapeños que se obtuvieron no parecen haber sufrido severos daños durante los períodos de exposición más cortos. Por el contrario, hacia el final del proceso (25 segundos), para las tres masas, es en donde se observa un desprendimiento de la piel de los chiles, por lo que, desde el punto de vista sensorial, el calentamiento por microondas no parece ser un método adecuado de calentamiento, al menos en las condiciones trabajadas.

### 8.3.- TRATAMIENTO MATEMÁTICO

Por otro lado, para determinar la influencia del tiempo de calentamiento y la cantidad de masa sometida a calentamiento sobre la pérdida de dureza y variación de color en los vegetales estudiados, y buscando relacionar todas las variables manejadas en el mismo, se ha sugerido emplear un procedimiento matemático análogo al método de *tiempo de muerte térmica* (TDT) empleado en el campo de la microbiología y describir así el comportamiento que los cambios en color y dureza siguen a lo largo del proceso llevado a cabo.

Este método matemático consiste en graficar, en un plano semilogarítmico, el porcentaje de dureza retenido por cada muestra (tras someterse a calentamiento), contra el tiempo de exposición al campo electromagnético, (es decir, log % dureza vs. tiempo), para cada una de las masa involucradas.



La pendiente de cada una de las rectas obtenidas queda descrita en los siguientes términos:

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{\log \% \text{ Dureza}_{\text{FINAL}} - \log \% \text{ Dureza}_{\text{INICIAL}}}{t_2 - t_1} \quad (18)$$

en donde:

m= pendiente de la recta;

log % Dureza<sub>FINAL</sub> =logaritmo del porcentaje de dureza final;

$\log \% \text{ Dureza}_{\text{INICIAL}}$  = logaritmo del porcentaje de dureza inicial;

$t_1$  = tiempo 1

$t_2$  = tiempo 2

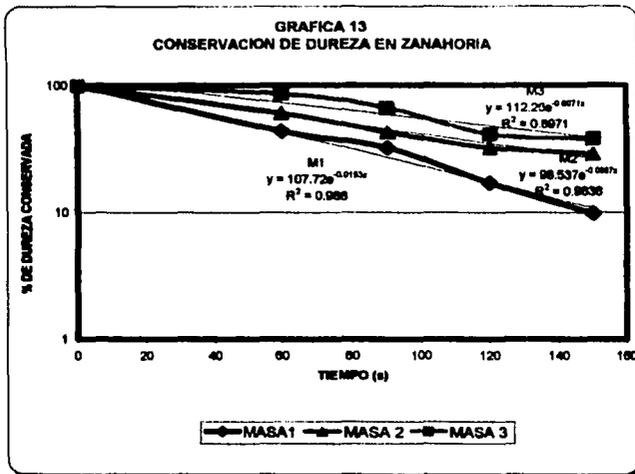
La pendiente de cada recta se graficará posteriormente contra el peso promedio de las muestras, de nueva cuenta, en un plano semilogarítmico (es decir,  $\log m$  vs. peso). La ecuación que describa este comportamiento quedará definida en función de la masa, por lo que sólo será necesario precisar la cantidad de masa que se desee someter a calentamiento y el tiempo en que se quiera llevar a cabo el mismo para predecir, con una razonable aproximación, la pérdida de dureza que una muestra sufrirá al ser sometida a un calentamiento por microondas en las condiciones definidas previamente.

A continuación se presenta, paso a paso, este procedimiento aplicado para zanahoria. En los casos de chile y papa, dado que se ha seguido exactamente el mismo procedimiento, sólo se presentarán las gráficas, ecuaciones y resultados obtenidos, sin pasos intermedios.

En el cuadro 3, se resumen los datos obtenidos durante todo el proceso experimental para zanahoria. En éste, en la última columna, se reportan las pérdidas de dureza, y dado que las cifras graficadas corresponden la dureza retenida por cada muestra, a un 100% se restaron estos valores obteniendo así los correspondientes a este parámetro.

La gráfica semilogarítmica, así como las ecuaciones que definen el comportamiento de cada una de las rectas, se presenta a continuación:

Las ecuaciones que describen el comportamiento de las rectas, para las masas 1, 2 y 3 respectivamente (M1, M2 y M3 en la gráfica), son las siguientes:

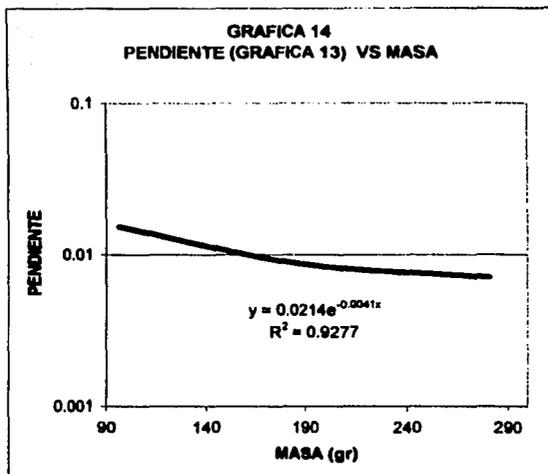


$$Y = 107.72 e^{-0.0153x}$$

$$Y = 98.537 e^{-0.0087x}$$

$$Y = 112.26 e^{-0.0071x}$$

La pendiente de cada una de las ecuaciones anteriores (D), se grafica con respecto al peso de las muestras respectivas, en un plano semilogarítmico, obteniéndose la siguiente gráfica:



Con la ecuación

$$Y = 0.0214e^{-0.0041x}$$

En donde  $x$  corresponde al peso de la muestra (en gramos). Podemos interpolar el valor puntual de  $D$  para cualquier masa dentro del rango experimentado y sustituir a este en la ecuación (18)

$$m = -\frac{1}{D} \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{\log \% \text{ Dureza}_F - \log \% \text{ Dureza}_I}{t_2 - t_1}$$

De donde es posible despejar el valor de la pérdida de dureza que una determinada masa de zanahorias alcanzará en un determinado tiempo de exposición a un campo electromagnético.

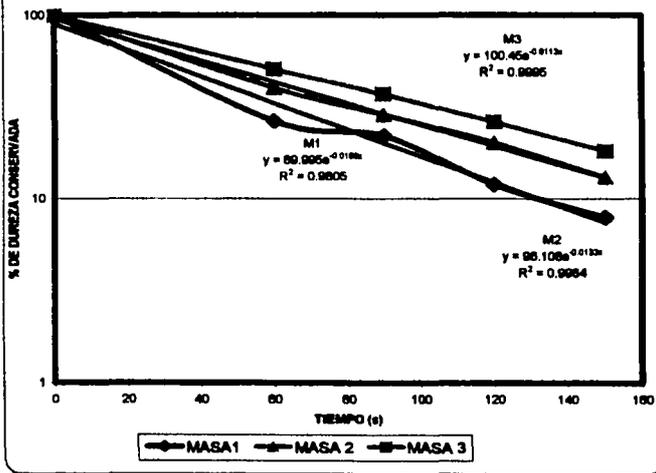
El siguiente cuadro confronta los valores obtenidos (para zanahoria), según el método anteriormente descrito contra los datos obtenidos experimentalmente. En éste se observa que el método, efectivamente, arroja valores relativamente cercanos a los reales en un buen número de eventos.

Cuadro No. 9.- Datos comparativos de dureza en zanahoria

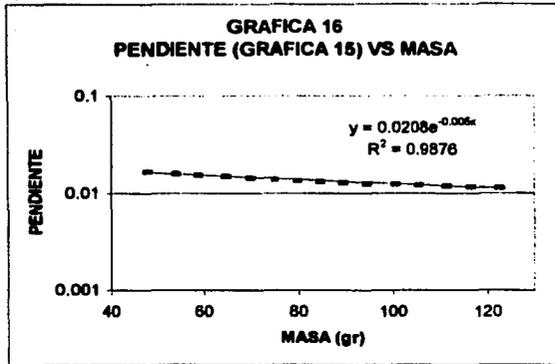
MASA	TIEMPO DE CALENTAMIENTO	DUREZA RETENIDA (EXPERIMENTAL)	DUREZA RETENIDA (CALCULADA)
	[S]	(%)	(%)
1 (95.92g)	60.00	43.59	42.04
	90.00	32.16	27.26
	120.00	16.90	17.68
	150.00	9.81	11.46
2 (187.44g)	60.00	60.62	55.13
	90.00	42.63	40.94
	120.00	32.03	30.40
	150.00	28.87	22.57
3 (281.20g)	60.00	66.12	66.67
	90.00	66.93	54.44
	120.00	41.19	44.45
	150.00	37.99	36.30

Siguiendo el procedimiento anterior, para el caso de papa, se obtuvieron las siguientes gráficas:

**GRAFICA 15**  
**CONSERVACION DE DUREZA EN PAPA**



Las pendientes de las gráficas obtenidas, al graficarse en un plano semilogarítmico respecto a la cantidad de masa, arrojaron la siguiente gráfica:



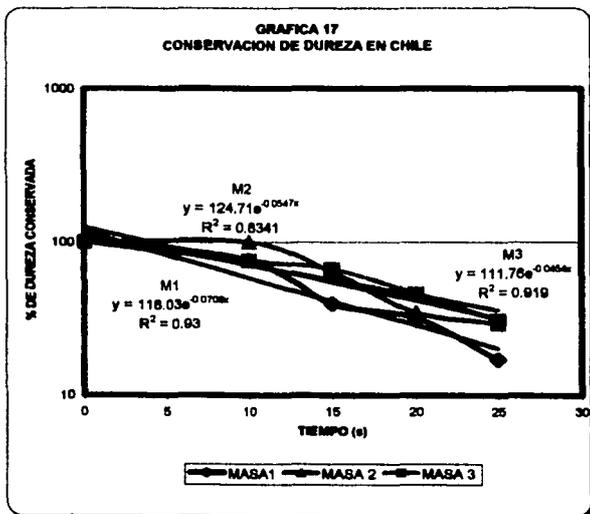
Los datos obtenidos se muestran en el siguiente cuadro

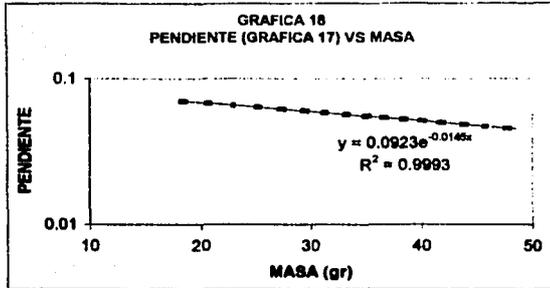
**Cuadro No. 10.- Datos comparativos de dureza en papa**

MASA	TIEMPO DE CALENTAMIENTO	DUREZA RETENIDA (EXPERIMENTAL)	DUREZA RETENIDA (CALCULADA)
	(s)	(%)	%
1 (47.32g)	60.00	26.55	37.34
	90.00	22.00	22.62
	120.00	11.91	13.94
	150.00	7.91	8.52
2 (64.11g)	60.00	40.23	44.06
	90.00	28.71	29.25
	120.00	20.24	19.42
	150.00	13.10	12.69
3 (124.07g)	60.00	50.62	51.11
	90.00	37.19	36.54
	120.00	26.25	26.13
	150.00	18.23	18.66

Salvo en masa 1, en donde se obtuvieron desviaciones superiores al 10% respecto a los datos experimentales, en la mayoría de los eventos observamos cifras calculadas muy cercanas a estos.

Por lo que respecta al Chile, es en este en donde se presentaron las mayores diferencias entre los datos experimentales y los datos calculados, tal y como el cuadro, a continuación de las gráficas lo demuestra.





**Cuadro No. 11.- Datos comparativos de dureza en Chile**

MASA	TIEMPO DE CALENTAMIENTO	DUREZA RETENIDA (EXPERIMENTAL)	DUREZA RETENIDA (CALCULADA)
	(s)	(%)	%
1 (18.23g)	10.00	76.08	49.23
	15.00	39.42	34.55
	20.00	31.90	24.24
	25.00	17.09	17.01
2 (36.44g)	10.00	100.00	58.03
	15.00	64.16	44.21
	20.00	34.62	33.68
	25.00	29.48	25.66
3 (48.53g)	10.00	75.69	63.34
	15.00	66.90	50.41
	20.00	46.26	40.12
	25.00	30.98	31.93

De acuerdo a lo anterior, en el caso de zanahoria y papa, es posible emplear el método matemático propuesto para predecir el efecto de las microondas sobre la dureza, ya que, salvo algunos eventos, las variaciones que se presentan entre los datos experimentales y los obtenidos a través de este tratamiento matemático son mínimos. Por supuesto, para ello habrá que considerar las limitaciones que las simplificaciones que se han hecho a lo largo del trabajo experimental suponen, tales como cantidad de masa, tiempos de calentamiento, geometría, potencia del horno, etc. Asimismo, y nuevamente para el caso de zanahoria y papa, queda confirmada la hipótesis general

de este trabajo, ya que se ha comprobado el decrecimiento exponencial de la dureza con respecto al tiempo, obedeciendo, de esta manera, a una cinética de primer orden.

En el caso del Chile, las altas diferencias encontradas entre ambos tipos de datos, no nos permiten el empleo de los mismos para predecir su comportamiento a lo largo de un proceso.

Por lo que al color respecta, la dificultad que conlleva el empleo de logaritmos negativos, así como los relativamente complejos patrones que este ha supuesto al tratar de llevar a cabo el mismo procedimiento que se ha llevado a cabo para dureza, han orillado a que en el presente trabajo no se considere un estudio similar al aplicado a dureza.

## CAPITULO NUEVE

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Aún y cuando en el presente trabajo fueron omitidos algunos factores de relevante importancia, tales como la geometría de las muestras, potencia del horno, efectos de bordes, dimensiones del horno, etc., las relaciones existentes entre dureza y color de chile, zanahoria y papa respecto al tiempo de calentamiento por microondas (Objetivo 2), así como con la cantidad de masa sometida a calentamiento (Objetivo 3), pudieron ser establecidas claramente, a pesar de que no en todos los casos fue posible la obtención de datos estadísticamente semejantes. Es claro que la combinación adecuada de los factores tiempo de exposición-cantidad de masa sometida a calentamiento, bien pueden ser conjugados para la obtención de productos destinados a ciertos fines, es decir, aún cuando el propósito de este trabajo de investigación no fué el establecer parámetros comparativos entre el empleo de microondas contra algún otro método de calentamiento convencional, la obtención de productos sensorialmente aceptables nos hace pensar en este proceso como un medio adecuado para el tratamiento de alimentos destinados a su comercialización como minimamente procesados, por ejemplo (a reserva de corroborar su factibilidad como tratamiento de conservación y su factibilidad económica), o bien el empleo de las microondas como una operación dentro de un proceso de transformación.

El hecho de no emplear líquidos como medios de transferencia de calor contribuye significativamente en la conservación de las características de color y dureza en los alimentos estudiados, ya que no hay disolución de pigmentos, no se llevan a cabo cierto tipo de reacciones características de sistemas de calentamiento en medios acuosos, que actúen en detrimento de dichos pigmentos (como por ejemplo, la descomposición de la clorofila en feofitina en un medio acuoso); además, no hay pérdidas de nutrientes por arrastre.

Los resultados obtenidos nos han permitido obtener una serie de ecuaciones capaces de predecir con cierto grado de exactitud los efectos que las ondas electromagnéticas ejercen sobre muestras de papa y zanahoria, en función de las variables controladas en la experimentación, con lo que se confirmó la hipótesis general de este trabajo, ya que fue posible confirmar que la cinética de pérdida de dureza, en las condiciones experimentales seguidas, sigue un comportamiento clásico de primer orden. Por supuesto, su posible empleo deberá considerar las simplificaciones que en dicha experimentación han sido hechas y las limitaciones que un trabajo en laboratorio implica.

Este trabajo dista mucho de estar completo, ya que como se ha explicado párrafos arriba, y a lo largo del mismo, el papel que otras variables antes mencionadas juegan en un proceso de calentamiento por microondas, todavía debe ser esclarecido, además de ser necesario un estudio de las mismas sobre los entes bioquímicos y microbiológicos presentes en cualquier alimento. Por último, habrá de someter este tipo de procesos a un riguroso análisis de factibilidad económica, ya que aunque al parecer, el empleo de microondas en el procesado de alimentos, puede ser un medio para disminuir los efectos en color y dureza (atributos siempre importantes en la aceptación de un producto), esto no siempre es el factor decisivo para establecer si un proceso es, o no, susceptible de ser empleado a escala comercial.

## BIBLIOGRAFÍA

- Alonso Fernando. El cultivo de la patata. Ediciones Mundi-Prensa. México, 1996.
- Anuario estadístico de la producción agrícola de los Estados Unidos Mexicanos. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Centro de Estadística Agropecuaria. México, 1999.
- Arthey David, Colín Dennis. Procesado de hortalizas. Ed. Acribia, S. A. Zaragoza, España. 1992.
- Askeland Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales. 3ª Edición. International Thomson Editores. México, 1998.
- Atkins Peter. The elements of physical chemistry. 3<sup>rd</sup> Edition. Oxford University Press. Great Britain, 2001.
- Badui D. Salvador. Química de los alimentos. Prentice Hall. México. 1999
- Billmeyer Fred W, Saltman Max. Principles of color technology. 2<sup>nd</sup> edition. John Wiley n' Sons Inc. U.S.A. 1981.
- Bor S. Luh, Woodroof Guy Jasper. Commercial vegetable processing. The AVI Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut, 1982.
- Bourne Malcom C. Food texture and viscosity. Concept and measurement. Academic Press. USA, 1982.
- Buffer Charles R, PhD Microwave cooking and processing. Engineering fundamentals for the food scientist. AVI, U.S.A., 1992.

- Charley Helen. Tecnología de alimentos. Procesos químicos y físicos en la preparación de alimentos. Editorial Limusa S. A. de C. V. México, 1999.
- Chefel Jean Claude, Chefel Henry, Besoncon Pierre Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos. Editorial Acibia. España, 1992.
- Diccionario de los alimentos. Cocción, calorías, vitaminas, conservación. 2ª Edición. Editia Mexicana S.A. México. 1984
- Eckert F.R.G, Drake Robert M. Analysis of heat and mass transfer (International student edition). Mc Graw Hill. Tokyo. 1972
- Ensminger A, Ensminger M, Konlade J, Robson J. Foods and nutrition enciclopedia. Volume I. Pegus Press. USA, 1983.
- Ensminger A, Ensminger M, Konlade J, Robson J. Foods and nutrition enciclopedia. Volume II. Pegus Press. USA, 1983.
- Fellows Peter. Tecnología del procesado de los alimentos. Principios y prácticas. Ed. Acibia S.A. Zaragoza, España. 1994
- Francis F.G, Clydesdale F.M. Food colorimetry: Theory and applications. The AVI Publishing Company, Inc. Wesport Connecticut, 1975.
- Holdsworth S. D. Aseptic processing and packaging of food products. Elsevier Science Publishers LTD. London, 1992.
- Jen Joseph J. Quality factors of fruits and vegetables. Chemistry and technology. American Chemical Society. Washington D.C., 1989.
- Kern Donald Q. Procesos de transferencia de calor. Cia. Editorial Continental S.A. de C.V. México. 1998

- Lewis M. J. Propiedades físicas de los alimentos y de los sistemas de procesado. Editorial Acribia. Zaragoza, España, 1993.
- Levine Ira N. Fisicoquímica 4ª Edición, volumen 2. Mc Graw Hill. Madrid, España, 1996.
- Messiaen C.M. Las hortalizas. Blume distribuidora S.A. México, 1979.
- Moskowitz Howard R. Food Texture. Instrumental and sensory measurement. Marcel Dekker Inc. USA, 1987
- Nuez F, Gil Ortega R, Costa J. El cultivo de pimientos, chiles y ajíes. Ediciones Mundi-Prensa. México, 1996.
- Orear Jay. Física. Noriega Limusa. México. 1990
- Potter Norman N. La ciencia de los alimentos. Edutex S. A. México, 1978.
- Rhosenthal Andrew J. Food Texture. Measurement and perception Aspen Publication. Garthersburg, Maryland, 1999.
- Satin Morton. Food irradiation. A guidebook. Technomic Publishing Co., Inc. Lancaster, Pennsylvania (U.S.A.). 1993
- Talburt William F, Smith Ora. Potato processing. 4<sup>th</sup> Edition. The AVI Publishing Company. New York, 1987.
- Thorne Stuart. Food irradiation. Elsevier Applied Science. London. 1991
- Urbain Walter M. Food irradiation. Academic Press, Inc. U.S.A. 1986

Artículos

- El Chile y su trascendencia cultural.  
Claridades Agropecuarias  
Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural.  
No. 56, Abril 1998.
- La papa en México. Un cultivo con potencialidad.  
Claridades Agropecuarias  
Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural.  
No. 79, Marzo 2000.
- La zanahoria mexicana. Una hortaliza con un crecimiento sostenido. Claridades Agropecuarias. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. No. 57, Mayo 1998.