



Universidad Politécnica de Valencia
Departamento de Ingeniería Rural
y Agroalimentaria



UNIVERSIDAD
DE GUANAJUATO

Universidad de Guanajuato
Campus Irapuato - Salamanca
Departamento de Ingeniería Agrícola

*Programa ALFA de cooperación entre
Instituciones de Educación Superior
de la Unión Europea y América Latina*

**IMPEDANCIA BIO-ELÉCTRICA COMO TÉCNICA NO-DESTRUCTIVA PARA MEDIR LA
FIRMEZA DE LA FRESA (*Fragaria x ananassa* Duch) Y SU RELACIÓN CON TÉCNICAS
CONVENCIONALES**

*Tesis doctoral presentada a la Universidad
Politécnica de Valencia
para la obtención del grado de Doctor*

José Raymundo González Araiza

Codirectores:

María Coral Ortiz Sánchez

Francisco Miguel Vargas Luna

José Manuel Cabrera Sixto

ABRIL 2014

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL

	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
SÍMBOLOS	xxii
ABREVIATURAS	xxiii
RESUMEN	xxiv
1. CAPÍTULO 1. Introducción	1
1.1 Importancia del cultivo de la fresa	2
1.2 Importancia del cultivo de la fresa en México	2
1.3 La calidad de la fresa	6
2. CAPÍTULO 2. Revisión bibliográfica	8
2.1 El cultivo de la fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch)	9
2.1.1 Descripción morfológica	9
2.1.2 Descripción fisiológica	11
2.1.3 Recolección	14
2.2 El concepto de la calidad en las frutas	15
2.3 Propiedades que definen la calidad de la fruta	19
2.3.1 Propiedades electromagnéticas. Color	19
2.3.2 Propiedades eléctricas de los tejidos biológicos. Impedancia Bio-eléctrica	31
2.3.3 Propiedades mecánicas. Firmeza	48
2.4 Equipos para medir la calidad de frutas y hortalizas	57
2.4.1 Técnicas destructivas	57
2.4.2 Técnicas no - destructivas	65
2.4.2.1 Basadas en medidas de fuerza – deformación	65
2.4.2.2 Basadas en medidas fuerza – deformación - tiempo	70

2.4.2.3	Respuesta acústica	73
2.4.2.4	Sistemas ópticos	77
2.4.2.5	Resonancia magnética nuclear	79
2.4.3	Técnicas destructivas y no destructivas basadas en las propiedades eléctricas	81
2.4.3.1	Mediciones destructivas de la impedancia	81
2.4.3.2	Mediciones no – destructivas de la impedancia	87
3.	CAPÍTULO 3. Objetivos	94
3.1	Objetivo general	95
3.2	Objetivos específicos	95
4.	CAPÍTULO 4. Materiales y métodos	96
4.1	Plan de trabajo desarrollado	97
4.2	Material biológico	98
4.3	Características del equipo e instrumentos de medición utilizados	99
4.3.1	Refrigeración	99
4.3.2	Medición del peso	100
4.3.3	Medición del diámetro ecuatorial	100
4.3.4	Medición del color	100
4.3.5	Medición de la impedancia bio-eléctrica	101
4.3.6	Medición destructiva de la firmeza	105
4.4	Metodología	105
4.4.1	Muestreo	105
4.4.2	Ensayo de la medida no destructiva del color	109
4.4.3	Ensayo de la medida no destructiva de la impedancia bio-eléctrica	110
4.4.4	Ensayo de la medida destructiva de la firmeza	116
4.4.5	Pruebas estadísticas empleadas para el análisis de datos	118
5.	CAPÍTULO 5. Resultados y discusión	119
5.1	Introducción	120

5.2	Resultados de la clasificación previa según la norma mexicana	121
5.2.1	Clasificación previa de la variedad ‘Sweet charlie’ según la NOM.	121
5.2.2	Clasificación previa de la variedad ‘Festival’ según la NOM.	123
5.2.3	Clasificación previa de la variedad ‘Camino real’ según la NOM.	124
5.3	Resultados del ensayo de la medida no destructiva del color	130
5.3.1	El color según el “ <i>grado de madurez</i> ” y la variedad	130
5.3.2	Resultados de la medición de color para la variedad ‘Sweet charlie’	132
5.3.3	Resultados de la medición de color para la variedad ‘Festival’	141
5.3.4	Resultados de la medición de color para la variedad ‘Camino real’	149
5.4	Resultados del ensayo de la medida destructiva de la firmeza	157
5.4.1	La firmeza destructiva según el “ <i>grado de madurez</i> ” y la variedad	157
5.4.2	Resultados de la medición de la firmeza para la variedad ‘Sweet charlie’	158
5.4.3	Resultados de la medición de la firmeza para la variedad ‘Festival’	160
5.4.4	Resultados de la medición de la firmeza para la variedad ‘Camino real’	162
5.5	Resultados del ensayo de la medida no destructiva de la impedancia bio-eléctrica y su relación con el “ <i>grado de madurez</i> ”	163
5.5.1	Características del dispositivo para medir la impedancia bio - eléctrica	163
5.5.2	La impedancia bio-eléctrica según el “ <i>grado de madurez</i> ” y la variedad	165
5.5.3	Resultados de la medición de impedancia para la variedad ‘Sweet charlie’ y su relación con el “ <i>grado de madurez</i> ”	170
5.5.4	Resultados de la medición de la impedancia para la variedad ‘Festival’ y su relación con el “ <i>grado de madurez</i> ”	176

5.5.5	Resultados de la medición de la impedancia para la variedad 'Camino real' y su relación con el " <i>grado de madurez</i> "	181
5.6	La firmeza destructiva y su relación con las variables de impedancia y color	190
5.6.1	La firmeza y su relación con impedancia y color para la variedad 'Sweet charlie'	190
5.6.2	La firmeza y su relación con impedancia y color para la variedad 'Festival'	192
5.6.3	La firmeza y su relación con impedancia y color para la variedad 'Camino real'	193
6.	CAPÍTULO 6. Conclusiones	196
6.1	Conclusiones	197
6.2	Propuestas para trabajos posteriores	201
7.	CAPÍTULO 7. Bibliografía	202
8.	Anexos	221

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
2-1	Clasificación taxonómica de la fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch).	9
2-2	Normas de calidad a nivel nacional e internacional para la fresa.	18
2-3	Elementos usados en circuitos de impedancia electroquímica. Morales <i>et al.</i> , 2010.	45
2-4	Tamaños de probeta recomendados para medir la firmeza en frutos. Mitcham <i>et al.</i> , 1996.	61
2-5	Valores de m, n y K (adimensionales) para varios valores de θ , ASAE S368.3 Pruebas de compresión de alimentos de forma convexa, 1995	69
2-6	Resumen de trabajos de investigación relacionados con la medición destructiva y no destructiva de las propiedades eléctricas de materiales biológicos.	90
4-1	Especificaciones de tamaño según diámetro ecuatorial. NMX-FF-062-SCFI-2002	106
4-2	Características de los grupos definidos para este trabajo, de las tres variedades de fresa.	108
4-3	Formato para el registro de los resultados obtenidos durante los diferentes ensayos.	108
5-1	Resumen estadístico de los valores de diámetro y peso para cada grupo de la variedad 'Sweet charlie'.	122
5-2	Resumen estadístico de los valores de diámetro y peso para cada grupo de la variedad 'Festival'.	124
5-3	Resumen estadístico de los valores de diámetro y peso para cada grupo de la variedad 'Camino real'.	125
5-4	Valores promedio de las variables L*, a*, b* y h para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaños B y C.	133

5-5	Valores de ΔE^* entre los grupos de las fresas variedad 'Sweet charlie', tamaños B y C.	137
5-6	Resultados del análisis discriminante de los " <i>grados de madurez</i> " según las variables de color, para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaño B.	139
5-7	Funciones de clasificación para cada uno de los tres " <i>grados de madurez</i> " utilizando las variables de color, de fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaño B.	139
5-8	Resultados del análisis discriminante de los " <i>grados de madurez</i> " según las variables de color, para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaño C.	140
5-9	Funciones de clasificación para cada uno de los tres " <i>grados de madurez</i> " utilizando las variables de color de fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaño C.	140
5-10	Valores medios de las variables L^* , a^* , b^* y h para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C	143
5-11	Valores de ΔE^* entre los grupos de las fresas variedad 'Festival', tamaños B y C.	146
5-12	Resultados del análisis discriminante de los " <i>grados de madurez</i> " según las variables de color, para fresas de la variedad 'Festival', tamaño B.	147
5-13	Funciones de clasificación para cada uno de los tres " <i>grados de madurez</i> " utilizando las variables de color, para fresas de la variedad 'Festival', tamaño B.	147
5-14	Resultados del análisis discriminante de los " <i>grados de madurez</i> " según las variables de color, para fresas de la variedad 'Festival', tamaño C.	148
5-15	Funciones de clasificación para cada uno de los tres " <i>grados de madurez</i> " utilizando las variables de color, de fresas de la variedad 'Festival', tamaño C.	148
5-16	Valores medios de las variables L^* , a^* , b^* y h para fresas de la variedad 'Camino real', tamaños B y C.	150

5-17	Valores de ΔE^* entre los grupos de las fresas variedad 'Camino real', tamaños B y C.	153
5-18	Resultados del análisis discriminante de los " <i>grados de madurez</i> " según las variables de color, para fresas de la variedad 'Camino real', tamaño B.	154
5-19	Resultados del análisis discriminante de los " <i>grados de madurez</i> " según las variables de color, para fresas de la variedad 'Camino real', tamaño C.	154
5-20	Funciones de clasificación para cada uno de los tres " <i>grados de madurez</i> " utilizando las variables de color, de fresas de la variedad 'Camino real', tamaño B.	155
5-21	Funciones de clasificación para cada uno de los tres " <i>grados de madurez</i> " utilizando las variables de color, de fresas de la variedad 'Camino real', tamaño C.	155
5-22	Valores medios de la firmeza para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaños B y C.	159
5-23	Valores medios de la firmeza para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C.	161
5-24	Valores medios de la firmeza para fresas de la variedad 'Camino real', tamaños B y C.	162
5-25	Valores medios de las variables de impedancia para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaño B y C.	171
5-26	Resultados del análisis discriminante de los " <i>grados de madurez</i> " según las variables de impedancia para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaño B.	174
5-27	Funciones de clasificación para cada uno de los tres " <i>grados de madurez</i> " utilizando las variables de impedancia, de fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaño B.	175
5-28	Resultados del análisis discriminante de los " <i>grados de madurez</i> " según las variables de impedancia, para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaño C.	175

5-29	Funciones de clasificación para cada uno de los tres “ <i>grados de madurez</i> ” utilizando las variables de impedancia, de fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaño C.	176
5-30	Valores medios de las variables de impedancia para fresas de la variedad ‘Festival’, tamaños B y C.	177
5-31	Resultados del análisis discriminante de los “ <i>grados de madurez</i> ” según las variables de impedancia, para fresas de la variedad ‘Festival’, tamaño B.	179
5-32	Funciones de clasificación para cada uno de los tres “ <i>grados de madurez</i> ” utilizando las variables de impedancia, de fresas de la variedad ‘Festival’, tamaño B.	180
5-33	Resultados del análisis discriminante de los “ <i>grados de madurez</i> ” según las variables de impedancia, para fresas de la variedad ‘Festival’, tamaño C.	181
5-34	Valores medios de las variables de impedancia para fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaños B y C.	182
5-35	Resultados del análisis discriminante de los “ <i>grados de madurez</i> ” según las variables de impedancia, para fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaño B.	185
5-36	Funciones de clasificación para cada uno de los tres “ <i>grados de madurez</i> ” utilizando las variables de impedancia, de fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaño B.	186
5-37	Resultados del análisis discriminante de los “ <i>grados de madurez</i> ” según las variables de impedancia, para fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaño C.	186
5-38	Funciones de clasificación para cada uno de los tres “ <i>grados de madurez</i> ” utilizando las variables de impedancia, de fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaño C.	187
5-39	Resumen de la prueba de análisis discriminante en las categorías de “ <i>grado de madurez</i> ” según las variables de color e impedancia para las tres variedades de fresa.	189

5-40	Ecuaciones predictivas de la firmeza a partir de las variables de color e impedancia, para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaños B y C.	192
5-41	Ecuaciones predictivas de la firmeza a partir de las variables de color e impedancia para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C.	193
5-42	Ecuaciones predictivas de la firmeza a partir de las variables de color e impedancia para fresas de la variedad 'Camino real', tamaños B y C.	194
A-1	Valores de las mediciones de impedancia para medir la repetibilidad del dispositivo.	256

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2-1	Planta y fruto de la fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch).	10
2-2	Carta de formas del fruto de la fresa. Foundation Plant Materials Service. Universidad def California.	11
2-3	Fresa con porción de pedúnculo.	15
2-4	Diagrama simplificado de una sección transversal del ojo humano. González y Woods, 1996.	20
2-5	Espectro electromagnético. www.concursoespacial.com/tematicoLaTierra2_1.asp .	21
2-6	Comportamiento de la luz incidente en un fruto. Con datos de Valero, 2001.	22
2-7	Espectros de absorción de algunos pigmentos vegetales. http://es.reefbuilders.com/	24
2-8	Funciones de coincidencia de color. Konica Minolta 2003.	27
2-9	Espacio de color CIE L*a*b*, Konica Minolta, 2007.	28
2-10	Espacio de color L*C*h, Konica Minolta, 2007.	29
2-11	Espectrofotómetro. Modelo CM-508d marca Minolta. Manual introductorio Minolta.	30
2-12	Estructura de la membrana celular. http://toxamb.pharmacy.arizona.edu/c1-1-2-1.html	32
2-13	Diferentes profundidades de medición de la impedancia en función de la distancia y tamaño de los electrodos. Grimnes y Grottem, 2000.	36
2-14	Representación ideal de la permitividad y resistividad de los tejidos biológicos en función de la frecuencia. Citado en Miklavčič <i>et al</i> , 2006.	38
2-15	Circuito simple RE(RQ). Resistencia en serie (RE), elemento de fase constante (Q) y resistencia en paralelo (R). Morales <i>et al</i> , 2009.	40

2-16	Diagramas de circuitos eléctricos que representan la ecuación de Debye. R2, resistencia a baja frecuencia y la resistencia a alta frecuencia es R1 en paralelo con R2.	41
2-17	Diagramas de circuitos usados para modelar el flujo de corriente a través del tejido del caqui. (Harker y Forbes, 1997). Estos diagramas incluyen los siguientes componentes: resistencia de la pared celular (R1), resistencia del citoplasma (R2), resistencia de la vacuola (R4) capacitancia de la membrana plasmática (C3), capacitancia del tonoplasto (C5). En el modelo B, R1 y R4 son las resistencias intra e intercelular, y C capacitancia de la membrana. En el modelo C, R3 y R5, resistencias de la membrana plasmática y del tonoplasto, respectivamente.	41
2-18	a) Impedancia específica del hígado de conejillo de indias, b) Circuito equivalente propuesto para varios tejidos. Resistencia del interior de la célula (Ri), resistencia de la membrana (Rm) y capacitancia de la membrana (Cm). Cole, 1972.	42
2-19	Espectro de impedancia típico de fresas de la variedad 'Sweet charlie'. (Elaborado con datos propios)	43
2-20	Modelo eléctrico usado para tejidos biológicos. Capacitancia de la membrana (C1), capacitancia de otras membranas (C2), resistencia extracelular (R1), resistencia del citoplasma (R2) y resistencia de organelos (R3). (Inaba <i>et al.</i> , 1995).	43
2-21	Imagen microscópica (40X) de dos cortes al fruto de la fresa: a) región de la parte carnosa y b) parénquima esponjoso. Instituto de Neurobiología de la UNAM, 2010.	52
2-22	Imagen microscópica (10X) de dos cortes al fruto de la fresa a) región de la parte carnosa y b) parénquima esponjoso. Instituto de Neurobiología de la UNAM, 2010.	53
2-23	Corte transversal de la fresa variedad 'Sweet charlie', "grado de madurez" 6.	53
2-24	Penetrómetro modelo F.T.327, marca Effegi. Spectrum International.	59
2-25	Principio de operación del Massey Twist Tester. Studman, 1995	62

2-26	Máquina Universal de Pruebas (UTM, por sus siglas en inglés). Departamento de Maquinaria Agrícola y Procesos de la Universidad Católica de Leuven, Bélgica.	63
2-27	Texturómetro TA-XT2 marca Stable Micro Systems. Departamento de Ciencias de la Vida Campus Irapuato – Salamanca, Universidad de Guanajuato.	63
2-28	Equipo PENEDEL DFT 14 para medir la firmeza de manera no destructiva. www.infoagro.com	64
2-29	Curva tensión –deformación tipo. LE, límite elástico. LF, límite de fluencia. PR, punto de ruptura. DE y DP, deformaciones elástica y plástica y $tg(a)$ es el módulo de elasticidad. Barreiro y Ruiz-Altisent, 1996.	66
2-30	Módulo de elasticidad aparente calculado con datos de fuerza y deformación para diferentes geometrías de carga. ASAE S368.3.	68
2-31	Esquema de dos células que muestra el apoplasto y simplasto, http://en.wikipedia.org/wiki/Apoplast	82
2-32	Diagrama del circuito equivalente del sistema electrodo y de la conductividad del medio. R_r y C_r representan la resistencia y capacitancia de los electrodos. R_p y C_p representan la polarización de la impedancia en los electrodos. R_f y C_f representan la impedancia de la muestra.	86
2-33	Circuito eléctrico equivalente para el mango. R_{ef} , resistencia eficaz y C_{ef} , capacitancia eficaz. Rehman <i>et al.</i> (2010)	87
2-34	Detalle del dispositivo empleado para medir la impedancia del mango. Rehman <i>et al.</i> (2011)	88
4-1	Diagrama del plan de trabajo realizado.	97
4-2	Variedades de fresa utilizadas. a) ‘Sweet charlie’, b) ‘Festival’, c) ‘Camino real’.	98
4-3	El autor en el campo de cultivo de la fresa. Ejido Serrano, Irapuato.	99

4-4	Refrigerador portátil, marca ENGEL.	99
4-5	a) Espectrofotómetro serie CM-508d marca MINOLTA, b) principio de iluminación.	101
4-6	Bosquejos preliminares sobre el diseño del prototipo para medir impedancia en la fresa.	103
4-7	Arreglo de los 4 electrodos de cobre. Los electrodos 1 y 2 son la fuente de corriente mientras que 3 y 4 son los que miden la intensidad de dicha corriente.	104
4-8	Dispositivo para medir impedancia bio-eléctrica.	104
4-9	“Grado de madurez” de la fresa a través de los colores. NMX-FF-062-SCFI-2002	106
4-10	Diagrama de cromaticidad. Comunicación Precisa de los Colores Minolta, 2007.	110
4-11	Posición de la fresa durante el ensayo de medición de la impedancia bio-eléctrica.	111
4-12	Ventana del programa Zplot® para el control y análisis de impedancia. “Scribner Associates, Inc”.	112
4-13	Gráficas (Diagramas de Nyquist y Bode) del espectro de impedancia de la fresa.	113
4-14	Ventana secundaria del subprograma ZView™ con las opciones de los circuitos a aplicar. “Scribner Associates, Inc”.	115
4-15	Modelo del circuito eléctrico utilizado para medir las impedancias de los componentes eléctricos.	115
4-16	Zonas del fruto definidas para medir la firmeza.	116
4-17	Principio de la geometría semi – infinita, Bourne 2002.	117
4-18	Gráfica típica de una prueba de fuerza – deformación.	117
5-1	Gráficas comparativas entre los valores medios del diámetro ecuatorial para las tres variedades de fresa, tamaño B, en los diferentes “grados de madurez”.	126

5-2	Gráficas comparativas entre los valores medios del diámetro ecuatorial para las tres variedades de fresa, tamaño C, en los diferentes “ <i>grados de madurez</i> ”.	127
5-3	Gráficas comparativas entre los valores medios del diámetro polar para las tres variedades de fresa, tamaño B, en los diferentes “ <i>grados de madurez</i> ”.	127
5-4	Gráficas comparativas entre los valores medios del diámetro polar para las tres variedades de fresa, tamaño C, en los diferentes “ <i>grados de madurez</i> ”.	128
5-5	Gráficas comparativas entre los valores medios del peso para las tres variedades de fresa, tamaño B, en los diferentes “ <i>grados de madurez</i> ”.	128
5-6	Gráficas comparativas entre los valores medios del peso para las tres variedades de fresa, tamaño C, en los diferentes “ <i>grados de madurez</i> ”.	129
5-7	Forma típica de las tres variedades de fresa usadas en este trabajo. a) Variedades ‘Festival’ y ‘Camino real’, b) variedad ‘Sweet charlie’.	129
5-8	Gráfico de interacción, valor de L según las variedades y los valores de “ <i>grado de madurez</i> ”.	130
5-9	Medias e intervalos LSD (95%) de la coordenada de color L para las distintas variedades.	131
5-10	Comportamiento de las variables de color para las fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaño B, en los tres niveles de “ <i>grado de madurez</i> ” predeterminado.	135
5-11	Comportamiento de las variables de color para las fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaño C, en los tres niveles de “ <i>grado de madurez</i> ” predeterminado.	136
5-12	Comportamiento de las variables de color para las fresas de la variedad ‘Festival’, tamaño B, en los tres niveles de “ <i>grado de madurez</i> ” predeterminado.	144

5-13	Comportamiento de las variables de color para las fresas de la variedad 'Festival', tamaño C, en los tres niveles de "grado de madurez" predeterminado.	145
5-14	Comportamiento de las variables de color para las fresas de la variedad 'Camino real', tamaño B, en los tres niveles de "grado de madurez" predeterminado.	151
5-15	Comportamiento de las variables de color para las fresas de la variedad 'Camino real', tamaño C, en los tres niveles de "grado de madurez" predeterminado.	152
5-16	Medias e intervalos LSD (95%) de la firmeza destructiva (N) para las distintas variedades.	158
5-17	Gráfica de los valores medios de la firmeza para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaños B y C.	160
5-18	Gráfica de los valores medios de la firmeza para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C.	161
5-19	Gráfica de los valores medios de la firmeza para fresas de la variedad 'Camino real', tamaños B y C.	163
5-20	Gráfico de interacción, valor de Rs según las variedades y los valores de "grado de madurez".	165
5-21	Medias e intervalos LSD (95%) de la variable de impedancia Rs para las distintas variedades.	165
5-22	Medias e intervalos LSD (95%) de la variable de impedancia Rs para los "grados de madurez" 4 y 6, inferior y superior.	166
5-23	Medias e intervalos LSD (95%) de la variable de impedancia Rs para las distintas variedades.	167
5-24	Medias e intervalos LSD (95%) de CPE-T para las distintas variedades.	168
5-25	Gráfico de interacción, valor de CPE-P según las variedades y los valores de "grado de madurez".	169
5-26	Medias e intervalos LSD (95%) de CPE-P para las distintas variedades.	169

5-27	Gráficas del comportamiento de los valores de R_s para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaños B y C, en los tres niveles de "grado de madurez".	172
5-28	Gráficas del comportamiento de los valores de CPE-T para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaños B y C, en los tres niveles de "grado de madurez".	172
5-29	Gráficas del comportamiento de los valores de CPE-P para fresas de la variedad 'Sweet charlie' tamaños B y C, en los tres niveles de "grado de madurez".	172
5-30	Gráficas de los valores de R_p para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaños B y C, en los tres niveles de "grado de madurez".	173
5-31	Gráficas del comportamiento de los valores de R_s para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C, en los tres niveles de "grado de madurez".	177
5-32	Gráficas del comportamiento de los valores de CPE-T para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C, en los tres niveles de "grado de madurez".	178
5-33	Gráficas del comportamiento de los valores de CPE-P para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C, en los tres niveles de "grado de madurez".	178
5-34	Gráficas del comportamiento de los valores de R_p para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C, en los tres niveles de "grado de madurez".	179
5-35	Gráficas del comportamiento de los valores de R_s para fresas de la variedad 'Camino real', tamaños B y C, en los tres niveles de "grado de madurez".	183
5-36	Gráficas del comportamiento de los valores de CPE-T para fresas de la variedad 'Camino real', tamaños B y C, en los tres niveles de "grado de madurez".	184
5-37	Gráficas del comportamiento de los valores de CPE - P para fresas de la variedad 'Camino real', tamaños B y C, en los tres niveles de "grado de madurez".	184

5-38	Gráficas del comportamiento de los valores de Rp para fresas de la variedad 'Camino real', tamaños B y C, en los tres niveles de "grado de madurez".	184
A-1	Espacio de color para la coordenada de cromaticidad a un valor de L* = 50	222
A-2	Equipo DUROFEL no destructivo para medir la firmeza. www.durofel.com	226
A-3	Detalle del equipo "FirmTech II" para medir la firmeza de frutos pequeños. www.bio-works.us	227
A-4	Diagrama del dispositivo portátil para medir la firmeza. Timm <i>et al</i> , 1996.	228
A-5	"Softness meter". A. micrómetro digital; B. pesa de 0.100 kg; C. tubo con anillo en la base conectado a D; D. huso del micrómetro; E. cable de arranque; F. fruto y G, sistema de adquisición de datos. Davie <i>et al</i> , 1996.	228
A-6	Detalle del impactador de caída libre. Diezma <i>et al</i> , 2001.	229
A-7	Medidor de firmeza Sinclair iQTM.	231
A-8	Equipo AWETA para medir el factor S. Departamento de Maquinaria Agrícola y Procesos de la Universidad Católica de Leuven, Bélgica.	232
A-9	Sistema de imagen multiespectral. Lu, 2004.	233
A-10	Esquema de un sistema de imagen multiespectral para medir la dispersión de la luz en manzana. Lu, 2004.	234
A-11	Principio de funcionamiento de la técnica ERDT. Valero, 2001.	235
A-12	Equipo ERDT de laboratorio. Valero, 2001.	235
A-13	Esquema del sistema de imagen hiperespectral. Lu y Peng, 2006.	236
A-14	Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad 'Sweet charlie', "grado de madurez" 4.	239

A-15	Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad 'Sweet charlie', "grado de madurez" 5.	239
A-16	Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad 'Sweet charlie', "grado de madurez" 6.	239
A-17	Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad 'Sweet charlie', "grado de madurez" 4.	239
A-18	Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad 'Sweet charlie', "grado de madurez" 5.	239
A-19	Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad 'Sweet charlie', "grado de madurez" 6.	239
A-20	Gráfica de los valores para el peso de fresas variedad 'Sweet charlie', "grado de madurez" 4.	240
A-21	Gráfica de los valores para el peso de fresas variedad 'Sweet charlie', "grado de madurez" 5.	240
A-22	Gráfica de los valores para el peso de fresas variedad 'Sweet charlie', "grado de madurez" 6.	240
A-23	Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad 'Festival', "grado de madurez" 2.	241
A-24	Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad 'Festival', "grado de madurez" 4.	241
A-25	Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad 'Festival', "grado de madurez" 6.	241
A-26	Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad 'Festival', "grado de madurez" 2.	241
A-27	Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad 'Festival', "grado de madurez" 4.	241
A-28	Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad 'Festival', "grado de madurez" 6.	241
A-29	Gráfica de los valores del peso de las fresas variedad 'Festival', "grado de madurez" 2.	242

A-30	Gráfica de los valores del peso de las fresas variedad 'Festival', "grado de madurez" 4.	242
A-31	Gráfica de los valores del peso de las fresas variedad 'Festival', "grado de madurez" 6.	242
A-32	Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad 'Camino real', "grado de madurez" 2.	243
A-33	Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad 'Camino real', "grado de madurez" 4.	243
A-34	Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad 'Camino real', "grado de madurez" 6.	243
A-35	Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad 'Camino real', "grado de madurez" 2.	243
A-36	Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad 'Camino real', "grado de madurez" 4.	243
A-37	Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad 'Camino real', "grado de madurez" 6.	243
A-38	Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad 'Camino real', "grado de madurez" 2.	244
A-39	Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad 'Camino real', "grado de madurez" 4.	244
A-40	Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad 'Camino real', "grado de madurez" 6.	244
A-41	Diagrama de dispersión correspondiente a los valores de las variables de color de los grupos de fresas con diferente "grado de madurez" de la variedad 'Sweet charlie', tamaño B.	251
A-42	Diagrama de dispersión correspondiente a los valores de las variables de color de los grupos de fresas con diferente "grado de madurez" de la variedad 'Sweet charlie', tamaño C.	251
A-43	Diagrama de dispersión correspondiente a los valores de las variables de color de los grupos de fresas con diferente "grado de madurez" de la variedad 'Festival', tamaño B.	252

A-44	Diagrama de dispersión correspondiente a los valores de las variables de color de los grupos de fresas con diferente “ <i>grado de madurez</i> ” de la variedad ‘Festival’, tamaño C.	252
A-45	Diagrama de dispersión correspondiente a los valores de las variables de color de los grupos de fresas con diferente “ <i>grado de madurez</i> ” de la variedad ‘Camino real’, tamaño B.	253
A-46	Diagrama de dispersión correspondiente a los valores de las variables de color de los grupos de fresas con diferente “ <i>grado de madurez</i> ” de la variedad ‘Camino real’, tamaño C.	253
A-47	Gráficas de los valores de la firmeza para fresas con diferente “ <i>grado de madurez</i> ” de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaños B y C.	255
A-48	Gráficas de los valores de la firmeza para fresas con diferente “ <i>grado de madurez</i> ” de la variedad ‘Festival’, tamaños B y C.	255
A-49	Gráficas de los valores de la firmeza para fresas con diferente “ <i>grado de madurez</i> ” de la variedad ‘Camino real’, tamaños B y C.	255

SÍMBOLOS

Símbolo	Definición
t	Tonelada
€	euro
λ	Longitud de onda, nm
a*	Coordenada de cromaticidad del espacio de color CIELAB
b*	Coordenada de cromaticidad del espacio de color CIELAB
σ	Desviación estándar
σ'	Conductividad eléctrica, $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$
°C	Grados centígrados
L*	Luminosidad, espacio de color CIELAB
x	Media aritmética
μF	micro Faraday
μl	micro litros
mg	miligramos
nm	nano metros
ϵ'	permitividad relativa
C*	Valor cromático
h^*_{ab}	Ángulo de tono métrico
ΔE^*_{ab}	Diferencia de color
ω	Frecuencia, Hz
Z*	Impedancia compleja
R_p	Resistencia a baja frecuencia relacionada con la resistencia del medio extracelular, Ohmios.
R_s	Resistencia a alta frecuencia relacionada con la resistencia del medio intracelular, Ohmios.
CPE	Elemento de fase constante
CPE-T	Magnitud del CPE, relacionada con la estructura de la membrana celular, Faradios
CPE-P	Fase del CPE, relacionada con el grado de homogeneidad de la muestra, adimensional.
θ	Ángulo de fase teta
ϵ	Deformación unitaria
σ	Tensión
E	Modulo de Young o de elasticidad o Coeficiente de Elasticidad, Pa
F	Fuerza
A	área
l	altura
Ea	Módulo de elasticidad aparente
m	Masa, kg
ρ	Densidad, kg/m^3
S	Factor "stiffness"
μ_a	Coefficiente de absorción
μ_s	Coefficiente de dispersión

ABREVIATURAS

Abreviatura /Acrónimo	Definición
AC	Corriente alterna
ANOVA	Análisis de varianza
ASAE	"American Society for Agriculture Engineers"
CIE	"Commission Internationale de l'Eclairage"
CMYK	Modelo de color (Cian, Magenta, Amarillo, Negro)
CONAFRE	Consejo Nacional de la Fresa, A.C.
CPE	"Constant phase element"
Ctifl	"Centre technique interprofessionnel des fruits et légumes"
DC	Corriente directa
LSD	Diferencia mínima significativa
EEM	Espectro Electromagnético
ERDT	Espectroscopia laser de reflectancia difusa
FAO	"Food and Agriculture Organization of the United Nations"
FFT	"Fast Fourier Transform"
HSB	Modelo de color (Matiz, Saturación, Brillo)
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
ISO	"International Organization for Standardization"
NIR	"Near infrared"
NMR	"Nuclear magnetic resonance"
NMX	Norma Mexicana
RF	Radio frecuencia
RGB	Modelo de color (Rojo, Verde, Azul)
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera de la SAGARPA
TA	Total de antocianinas
USDA	"United States Department of Agriculture"
UTM	"Universal Testing Machine"
UNAM	Universidad Autónoma de México
UV	Rayos ultravioleta

RESUMEN

La técnica de impedancia bio-eléctrica permite la caracterización de sistemas biológicos mediante la aplicación de una corriente eléctrica en un rango de frecuencias determinado, logrando así la observación del comportamiento de las propiedades eléctricas, parámetros que están relacionados con la estructura y composición del material. Asimismo, el análisis de la impedancia bio-eléctrica, aplicada a los materiales biológicos, proporciona información acerca de los cambios fisiológicos dentro y fuera de la célula, así como de las membranas y los tejidos. Esta técnica tiene la ventaja de ser simple y no destructiva.

Basado en algunos estudios relacionados con las propiedades eléctricas que se han llevado a cabo en frutos como la nectarina, manzana, pepino, kiwi, caqui y fresa, el objetivo del presente trabajo fue desarrollar un procedimiento para medir de manera no destructiva la impedancia bio-eléctrica de tres variedades de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) ('Sweet charlie', 'Festival' y 'Camino real') con el propósito de conocer si existe una relación entre las variables de impedancia con la firmeza y el "*grado de madurez*" de las variedades en mención. La selección del fruto de la fresa se debió a que es un cultivo importante en el estado de Guanajuato.

Seis grupos por variedad fueron definidos utilizando como criterio de clasificación tres "*grados de madurez*" y dos tipos de tamaño según el diámetro ecuatorial, ambos indicados en la Norma mexicana NMX-FF-9-1982. La clasificación utilizando el primer criterio se llevó a cabo de manera subjetiva ya que se utilizó la tabla de los "*grados de maduración*" de la fresa a través de los colores y el segundo de manera objetiva utilizando un calibrador tipo Vernier.

Para lograr el objetivo se diseñó, construyó y probó un prototipo que permitió llevar a cabo los ensayos para medir la impedancia en el fruto de la fresa. Las mediciones se llevaron a cabo conectando el prototipo a un analizador de impedancia. Con los datos obtenidos se generaron los espectros de impedancia de los cuales a partir de un modelo de circuito predefinido se obtuvieron los valores de los elementos eléctricos R_s (resistor en serie), CPE (elemento de fase constante: magnitud CPE-T y fase CPE-P) y R_p (resistor en paralelo).

Así mismo y con el uso de un espectrofotómetro, se midió el color superficial de las fresas obteniendo los valores de la luminosidad L^* , y las coordenadas cromáticas a^* y b^* , los cuales también fueron utilizados para analizar su relación con los valores de la firmeza y el *“grado de madurez”*.

Los valores obtenidos de las variables de color L^* , a^* y b^* , para cada uno de los tres *“grados de madurez”*, fueron analizados utilizando la prueba estadística ANOVA, con el propósito de determinar si entre ellos existía una diferencia estadísticamente significativa. Los resultados mostraron en general para las tres variedades de fresas que los valores de L^* entre los diferentes grupos clasificados según su *“grado de madurez”*, son estadísticamente diferentes. Los valores de esta variable, en todos los casos, muestran una tendencia descendente conforme va madurando el fruto.

Para evaluar la diferencia de color medido con el colorímetro entre los frutos pertenecientes a cada grupo clasificados según su *“grado de madurez”*, se utilizó el índice de grado de diferencia de color ΔE^*_{ab} . En general los resultados mostraron diferencias significativas en ΔE^*_{ab} entre los diferentes grupos preestablecidos según su *“grado de madurez”*.

Con la finalidad de clasificar los “*grados de madurez*” preestablecidos según las variables de color L^* , a^* y b^* , se utilizó la prueba estadística de análisis discriminante, obteniendo para las variedades ‘Festival’ y ‘Camino real’ un porcentaje alto de casos correctamente clasificados. En promedio se obtuvieron valores de 94 % y 93 %, respectivamente.

En el caso de los resultados obtenidos de las mediciones de impedancia la prueba estadística ANOVA se utilizó con el objetivo de conocer si existían diferencias estadísticamente significativas en los valores de las variables de impedancia para los distintos niveles de “*grados de madurez*”. Los resultados no fueron los esperados, ya que no se observó una tendencia en los resultados obtenidos. Sin embargo, la prueba de análisis discriminante de los “*grados de madurez*” en función de las variables de impedancia mostró porcentajes de casos correctamente clasificados muy alentadores, ya que en el caso de los grupos tamaños B y C, de las fresas de la variedad ‘Camino real’, se obtuvieron porcentajes de 84 % y 82 %, respectivamente, según las variables de impedancia R_s , CPE-P, CPE-T y R_p .

Los resultados de las pruebas de análisis discriminante de los grupos de las variedades ‘Sweet charlie’ mostraron que las variables que mejor discriminan para los grupos clasificados según su “*grado de madurez*” son para color, L^* y para impedancia, CPE-P; para ‘Festival’ fueron las variables de color, a^* y de impedancia, R_s ; y finalmente, para ‘Camino real’ fueron las variables de color L^* y a^* y las variables de impedancia CPE-P y R_s .

En relación a los resultados de las mediciones destructivas de firmeza en general mostraron que las fresas más pequeñas son más resistentes. La variedad que

mostró los valores más altos de firmeza fue 'Festival' seguida de las fresas de la variedad 'Camino real' y 'Sweet charlie'.

Finalmente, se utilizó la prueba estadística de regresión lineal múltiple con el objetivo de explicar el comportamiento de la variable firmeza a partir de las variables explicativas de impedancia bio-eléctrica (R_s y CPE-P) y color (L^* , a^* y b^*).

Los modelos obtenidos a partir de las variables explicativas de color L^* , a^* y b^* mostraron para las variedades 'Sweet charlie' y 'Festival', valores del coeficiente de determinación R^2 mayores a los modelos que incluyen las variables explicativas de impedancia R_s y CPE-P. Los modelos que muestran la relación entre la variable firmeza con las variables explicativas R_s y CPE-P para la variedad 'Camino real' presentaron los valores mas altos del coeficiente de determinación.

ABSTRACT

The electrical bioimpedance technique provides the characterization of biological systems applying an electrical current in a certain frequency range. By this means the material structure and composition are extracted analysing the electrical properties. Furthermore, the electrical bioimpedance applied to the biological systems provides information about physiological changes in and out of the cell as well as in the membranes and tissues. An advantage of this technique is that it is simple and non-destructive.

Based on several previous studies in nectarine, apple, cucumber, kiwi, kaki and strawberry, the aim of this study was to develop a procedure for the non-destructive assessment of electrical bioimpedance in three strawberry varieties (*Fragaria x ananassa* Duch) ('Sweet charlie', 'Festival' and 'Camino real'), in order to relate impedance variables to firmness and maturity level. Strawberry fruit was chosen due to its importance in the region of Guanajuato. Six groups per variety were defined according to three maturity level and two equatorial diameter sizes, based on the Mexican law NMX-FF-9-1982. The classification according to maturity level was carried out subjectively considering colour from the strawberry maturity level table. The classification according to size was carried out objectively measuring equatorial diameter with a Vernier caliber.

In order to accomplish this objective, a prototype capable of estimating strawberry impedance was designed and tested. The measurements were performed connecting the prototype to an impedance analyzer. Using the spectrums generated from the analyzer data, the electrical elements values were calculated

based on a predefined circuit model, R_s (Serial Resistor), CPE (Constant Phase Element, Magnitude CPE-T and Phase CPE-P) and R_p (Parallel Resistor).

External colour of the strawberries was measured with a spectrophotometer and the coordinates L^* , a^* and b^* were obtained. The colour coordinates were used to relate them to firmness and maturity level.

Significant differences between the three maturity levels according to the colour coordinates were tested with an ANOVA analysis. Results showed that L^* value was significantly different in the three “maturity levels”. In all the cases, L^* value decreased along the ripening process.

The colour difference parameter (ΔE^*_{ab}) was used to analyze colour differences between the three maturity level groups. Significant differences were found between the three maturity level groups according to ΔE^*_{ab} .

In order to classify the pre-established maturity level groups according to L^* , a^* and b colour parameters, a discriminant analysis was carried out. ‘Festival’ and ‘Camino real’ varieties showed a high percentage of well classified fruits, 94% and 93% respectively.

Significant differences between the three maturity levels according to the impedance variables were tested with an ANOVA analysis. The results were not as expected, a clear tendency was not observed. However, high percentages of well classified fruit were found with a discriminant analysis test classifying the maturity level groups according to the impedance variables, 84% and 82% in ‘Camino real’ variety, size B and C respectively, using R_s , CPE-P, CPE-T y R_p .

L* as colour variable and CPE-P as impedance variable would better discriminate between maturity level groups in 'Sweet charlie' variety; a* and Rs in 'Festival'; and L* and a*, and CPE-P and Rs in 'Camino real'.

Related to the destructive firmness, smaller strawberries were firmer than medium and large fruit. 'Festival' strawberries had higher firmness than the other varieties, followed by 'Camino real' and 'Sweet charlie'. Finally, a multiple regression statistical test was used to explain destructive firmness according to impedance variables (Rs y CPE-P) and colour variables (L*, a* y b*).

In 'Sweet charlie' and 'Festival' varieties, the regression models based on the colour coordinates, L*, a* and b*, showed higher regression coefficient (R2) than the models based on the impedance variables, Rs and CPE-P. In the variety 'Camino real', the regression models based on the impedance variables, Rs and CPE-P, showed higher regression coefficient (R2) than the other models.

RESUM

La tècnica d'impedància bio-elèctrica permet la caracterització de sistemes biològics per mitjà de l'aplicació d'un corrent elèctric en un rang de freqüències determinat, aconseguint així l'observació del comportament de les propietats elèctriques, paràmetres que estan relacionats amb l'estructura i composició del material. Així mateix, l'anàlisi de la impedància bio-elèctrica, aplicada als materials biològics, proporciona informació sobre els canvis fisiològics dins i fora de la cèl·lula, així com de les membranes i els teixits. Esta tècnica té l'avantatge de ser simple i no destructiva. Alguns estudis relacionats amb esta propietat s'han dut a terme en fruits com la nectarina, poma, cogombre, kiwi, caqui i maduixa.

L'objectiu del present treball va ser desenrotllar un procediment per a mesurar de manera no destructiva la impedància bio-elèctrica de tres varietats de maduixa (*Fragaria x ananassa Duch*) ('Sweet charlie', 'Festival' i 'Camino real') amb el propòsit de conèixer si hi ha una relació entre les variables d'impedància amb la fermesa i el "grado de madurez" de les varietats en menció. La selecció del fruit de la maduixa es va deure al fet que és un cultiu important en l'estat de Guanajuato.

Sis grups per varietat van ser definits utilitzant com a criteri de classificació tres "grados de madurez" i dos tipus de grandària segons el diàmetre equatorial, ambdós indicats en la Norma mexicana NMX-FF-9-1982. La classificació utilitzant el primer criteri es va dur a terme de manera subjectiva ja que es va utilitzar la taula dels "grados de maduración" de la maduixa a través dels colors i el segon de manera objectiva utilitzant un calibrador tipus Vernier. Per a aconseguir l'objectiu es va dissenyar, va construir i va provar un prototip que va permetre dur a terme els assajos per a mesurar la impedància en el fruit de la maduixa. Els mesuraments

es van dur a terme connectant el prototip a un analitzador d'impedància. Amb les dades obtinguts es van generar els espectres d'impedància dels quals a partir d'un model de circuit predefinit es van obtenir els elements elèctrics R_s (resistor en sèrie), CPE (element de fase constant: magnitud CPE-T i fase CPE-P) i R_p (resistor en paral·lel).

Així mateix i amb l'ús d'un espectrofotòmetre, es va mesurar el color superficial de les maduixes obtenint els valors de la lluminositat L^* , i les coordenades cromàtiques a^* i b^* , els quals també van ser utilitzats per a analitzar la seua relació amb els valors de la fermesa i el "grado de madurez".

Els valors obtinguts de les variables de color L^* , a^* i b^* , per a cada un dels tres "grados de madurez", van ser analitzats utilitzant la prova estadística ANOVA, amb el propòsit de determinar si entre ells existia una diferència estadísticament significativa. Els resultats van mostrar en general per a les tres varietats de maduixes que els valors de L^* entre els diferents grups classificats segons el seu "grado de madurez", són estadísticament diferents. Els valors d'esta variable, en tots els casos, mostren una tendència descendent conforme va madurant el fruit. Per a avaluar la diferència de color mesurat amb el colorímetre entre els fruits pertanyents a cada grup classificats segons el seu "grado de madurez", es va utilitzar l'índex de grau de diferència de color ΔE^*_{ab} . En general els resultats van mostrar diferències significatives en ΔE^*_{ab} entre els diferents grups preestablits segons el seu "grado de madurez". Amb la finalitat de classificar els "grados de madurez" preestablits segons les variables de color L^* , a^* i b^* , es va utilitzar la prova estadística d'anàlisi discriminant, obtenint per a les varietats 'Festival' i 'Camino real' un procentaje alt de casos correctament classificats. Com a mitjana es van obtenir valors de 94 % i 93 %, respectivament.

En el cas dels resultats obtinguts dels mesuraments d'impedància la prova estadística ANOVA es va utilitzar amb l'objectiu de conèixer si hi havia diferències estadísticament significatives en els valors de les variables d'impedància per als diferents nivells de "grados de madurez". Els resultats no van ser els esperats, ja que no es va observar una tendència en els resultats obtinguts. No obstant això, la prova d'anàlisi discriminant dels "grados de madurez" en funció de les variables d'impedància va mostrar percentatges de casos correctament classificats molt encoratjadors, ja que en el cas dels grups grandàries B i C, de les maduixes de la varietat 'Camino real', es van obtenir percentatges de 84 % i 82 %, respectivament, segons les variables d'impedància R_s , CPE-P, CPE-T i R_p .

Els resultats de les proves d'anàlisi discriminant dels grups de les varietats 'Sweet charlie' van mostrar que les variables que millor discriminen per als grups classificats segons el seu "grado de madurez" són per a color, L^* i per a impedància, CPE-P; per a 'Festival' van ser les variables de color, a^* i d'impedància, R_s ; i finalment, per a 'Camino real' van ser les variables de color L^* i a^* i les variables d'impedància CPE-P i R_s .

En relació als resultats dels mesuraments destructius de fermesa en general van mostrar que les maduixes més xicotetes són més resistents. La varietat que va mostrar els valors més alts de fermesa va ser 'Festival' seguida de les maduixes de la varietat 'Camino real' i 'Sweet charlie'. Finalment, es va utilitzar la prova estadística de regressió lineal múltiple amb l'objectiu d'explicar el comportament de la variable fermesa a partir de les variables explicatives d'impedància bio-elèctrica (R_s i CPE-P) i color (L^* , a^* i b^*).

Els models obtinguts a partir de les variables explicatives de color L^* , a^* i b^* van mostrar per a les varietats 'Sweet charlie' i 'Festival', valors del coeficient de determinació R^2 majors als models que inclouen les variables explicatives d'impedància R_s i CPE-P. Els models que mostren la relació entre la variable fermesa amb les variables explicatives R_s i CPE-P per a la varietat 'Camí real' van presentar els valors més alts del coeficient de determinació.

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Importancia del cultivo de la fresa

La fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) es nativa de las regiones en el mundo con clima templado y se cultiva en grandes cantidades, tanto con fines comerciales como por parte de horticultores aficionados. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) el principal productor de fresa a nivel internacional en el año 2011 fue Estados Unidos de América con una producción de 1.312.960 t, en segundo lugar se encuentra España con 514.027 t, en tercer lugar está Turquía con 302.416 t; en cuarto lugar Egipto con 240.284 t y México ocupando el quinto lugar, tuvo una producción de 228.900 t en ese año. En México, la exportación de fresa es principalmente a Estados Unidos, Canadá, Brasil, Japón y Alemania.

1.2 Importancia del cultivo de la fresa en México

Según datos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2012), en la actualidad en México se siembran 6.467 hectáreas de fresa anualmente, con una producción aproximada de 165.000 toneladas al año y cuyo valor comercial en fresco y procesada supera los \$1.500 millones de pesos al año (€ 89,7 millones de euros / año). Los principales estados productores de fresa son: Michoacán, Baja California, Guanajuato y Estado de México. Gran parte de la producción del valle de Zamora, en el Estado de Michoacán, y la del Estado de Baja California se destinan a la exportación, ya sea en fresco o congelada, mientras que en Irapuato, Estado de Guanajuato, y el resto de las zonas productoras del Estado de Michoacán la mayoría de la producción se destina al consumo nacional.

Con datos obtenidos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la SAGARPA, en el Estado de Guanajuato, el municipio de Irapuato es el principal productor de fresa con 6.174 toneladas, producidas durante el año 2011, seguido por Tarandacua con 1.930,5 t y Salamanca con 1.380 t.

Las principales variedades de fresa, que por sus características de calidad tienen mejor adaptación a los climas de los diferentes Estados productores de fresa en el país, provienen de las Universidades de California y Florida ubicadas en Estados Unidos de América y de las cuales podemos mencionar las siguientes: 'Festival', 'Sweet charlie', 'Camino real', 'Albión' y 'Camarosa', entre otras.

Por otra parte, y como se menciona en el Plan Rector Sistema Producto Fresa (2009) también es importante considerar su alto valor social, ya que requiere de un elevado número de jornales tanto en el campo como en el procesamiento del producto, de tal manera que se estima que a nivel nacional se requiere anualmente de 3.296.522 jornales, para el proceso de producción y cosecha, con una derrama económica por el pago de mano de obra de \$395.582.640,00 (23.814.075,00 € a fecha de septiembre de 2012), en tanto que en la industria se utilizan cada año 452.653 jornales, con una erogación de \$54.318.360,00 (3.286.047,00 € a fecha de julio de 2013).

Al requerir de una gran cantidad de mano de obra, socialmente el cultivo de la fresa tiene los siguientes beneficios:

- Propicia el arraigo de la población rural, reduciendo el fenómeno migratorio de la fuerza laboral, principalmente de los jóvenes del campo.

- Contribuye a evitar la ruptura del tejido social, a través de la unión familiar al presentarse posibilidades de empleo en las zonas rurales donde se cultiva o se procesa la fresa.
- Reduce las condiciones propicias para la delincuencia, al brindar fuentes de trabajo rural.
- Contribuye a lograr una mejor calidad de vida, poniendo al alcance de los productores, trabajadores y empleados en todos los niveles, los servicios de salud, mejor infraestructura, mejor nivel de vida, etc.

Debido a la importancia del cultivo de la fresa en México, se estableció el Consejo Nacional de la Fresa, A.C. (CONAFRE) el cual está formado por los Consejos Estatales de Michoacán, Guanajuato y Estado de México. El objetivo principal del CONAFRE es generar esquemas integrales de organización entre los productores del cultivo de la fresa a través de la participación fundamental de los integrantes de cada uno de los eslabones de la cadena productiva de este importante sector y cuya misión se menciona a continuación:

“Sostener y proyectar la cadena productiva del cultivo de fresa fomentando entre los productores la organización y su participación en los procesos de investigación y transferencia de la tecnología que le permitan manejar sistemas de producción tecnológicos de vanguardia que impacten y fortalezcan cada uno de los eslabones de este importante sector productivo, abarcando desde el abastecimiento de insumos, servicios para la producción primaria, producción, acopio y distribución, hasta la comercialización y el consumo”.

Dentro de los eslabones de la cadena productiva se encuentran el de las Instituciones de Enseñanza e Investigación de las cuales podemos mencionar: El Colegio de Posgraduados en Ciencias Agrícolas, la Universidad Autónoma de

Chapingo, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), El Instituto Politécnico Nacional, **la Universidad de Guanajuato**, el Colegio de Michoacán, la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, la Universidad del Estado de México y la Coordinadora Nacional de las Fundaciones Produce, A.C., quienes realizan investigación científica aplicada al desarrollo del cultivo de la fresa.

EL 16 de diciembre de 2011, en la ciudad de Zamora, Michoacán, se llevó a cabo la revisión y actualización del Plan Rector Nacional del Sistema Producto Fresa 2012 en el que se definen 19 líneas estratégicas y 27 proyectos. Dentro de estos últimos y que son de nuestra incumbencia podemos mencionar los siguientes: 1. Generar trabajos de investigación en aspectos sustantivos que atiendan las necesidades de cada uno de los eslabones de esta cadena agroalimentaria, 2. Generación de nuevas tecnologías poscosecha, 3. Fortalecimiento a la infraestructura y equipo para la agroindustria, 4. Apoyar a la cadena agroalimentaria de la fresa, para dar valor agregado a su producto e incursionar de manera directa en los mercados nacional e internacional.

Como se ha visto, el cultivo de la fresa sigue siendo un producto que forma parte de nuestra cultura y sociedad y que debido a su importancia económica tanto a nivel municipal, estatal, regional y nacional, debemos fortalecer la vinculación entre el sector académico y productivo para generar nuevas tecnologías que resalten el valor agregado de este producto.

1.3 La calidad de la fresa

Actualmente, el productor de fresa requiere de variedades resistentes a plagas y enfermedades, altamente productivas y con buena calidad de fruto. El grado de madurez óptimo, ya sea el fisiológico o el organoléptico, es una de las principales características que debe tener un fruto de buena calidad. La firmeza tiene una buena correlación con la evolución de la madurez y es uno de los índices más importantes a la hora de definir las primeras fechas aceptables de inicio de cosecha, durante el proceso poscosecha y como atributo relevante dentro de las normas de calidad, tanto nacionales como internacionales.

Los estándares internacionales de calidad se basan en dos índices: uno de cosecha y otro de calidad. El índice de cosecha se basa en el color superficial de la fresa, el cual generalmente es medido por los jornaleros de manera visual (subjetivamente); y el de calidad, el cual está relacionado con la apariencia (color, tamaño, forma y ausencia de defectos), firmeza, sabor y valor nutricional. En el caso de la firmeza existen varios equipos, principalmente destructivos, que miden esta propiedad.

El desarrollo de técnicas y prototipos no destructivos para medir algunas propiedades, como la firmeza, han sido importantes para monitorear y controlar la calidad de los productos tanto en el campo como en la industria. Asimismo, los ensayos no destructivos permiten hacer varias mediciones en un mismo fruto, proporcionan información global y detectan daños internos. Estas técnicas incluyen, entre otras, la medición de variables extraídas de las curvas cuasi estáticas fuerza-deformación, del análisis de las fuerzas de impacto, y de la medición de la respuesta acústica al impacto no destructivo.

Las mediciones destructivas de impedancia bio-eléctrica han sido utilizadas para determinar el comportamiento fisiológico de los vegetales cuando son sometidos a diferentes condiciones como puede ser daño por frío, aclimatación a bajas temperaturas y daño por calor (citado en Jackson y Harker, 2000; Harker y Maindonald, 1994 e Inaba *et al.*, 1995), así como en el diagnóstico de deficiencias nutrimentales, infecciones por virus y caracterización de daños mecánicos, como las magulladuras (citado en Inaba *et al.*, 1995). En frutos, Harker y Maindonald (1994) midieron la impedancia eléctrica de la nectarina (*Prunus pérsica*) para caracterizar los cambios en la resistencia de los compartimentos intra y extracelular que ocurren en el tejido del fruto durante su maduración. En kiwi (*Actinidia deliciosa*) se ha estudiado el comportamiento de la impedancia durante la maduración, tanto en fruto completo como en muestras de tejido- mesocarpio y endocarpio (Bauchot, *et al.* 2000). Y en la fresa, Harker *et al.* (2000), utilizaron la espectroscopia de impedancia eléctrica para caracterizar los cambios físicos que ocurren durante el tratamiento con CO₂.

En este contexto, el trabajo experimental presentado en este documento muestra los resultados de las mediciones no destructivas de la impedancia bio-eléctrica y del color superficial y su relación con el “grado de madurez” y con la firmeza destructiva, de tres variedades de fresa (‘Sweet charlie’, ‘Festival’ y ‘Camino real’).

CAPÍTULO 2

Revisión bibliográfica

2.1 El cultivo de la fresa (*Fragaria x ananassa* Duch)

El nombre de la fresa deriva de la fragancia que posee (*fraga* en latín). Son cultivadas por su fruto comestible llamado; fresa, frutilla o fresón. Las variedades cultivadas comercialmente son por lo general híbridos, en especial *Fragaria x ananassa*, que ha remplazado casi universalmente a la especie silvestre *Fragaria vesca* por el tamaño superior de sus frutos. En la Tabla 2-1 se muestra la clasificación de la fresa desde el punto de vista botánico.

Tabla 2-1.
Clasificación taxonómica de la fresa (*Fragaria x ananassa* Duch).

Familia	<i>Rosaceae</i>
Subfamilia	<i>Rosoideae</i>
Tribu	<i>Potentilleae</i>
Género	<i>Fragaria</i>
Especie	<i>F. ananassa</i>

2.1.1 Descripción morfológica

La planta de la fresa (Figura 2-1) está formada por flores blancas que se organizan en racimos y tiene cáliz de cinco piezas hendidas, cinco pétalos redondeados, numerosos estambres y pistilos. El fruto comestible, denominado botánicamente “eterio”, es un fruto falso producto del engrosamiento del receptáculo en el que están insertos los aquenios, semillas pequeñas que son frutos verdaderos. El color de los aquenios puede ser amarillo, rojo, verde o marrón. Después de la fecundación, los óvulos al convertirse en aquenios estimulan el engrosamiento del receptáculo que, una vez transformado en carnosos, constituye el fruto (Branzanti, 1985).



Figura 2-1. Planta y fruto de la fresa.
(*Fragaria x ananassa* Duch).

En la base del fruto está el cáliz, con sépalos adherentes, libres o reflexos, verdes por lo general; el cáliz puede separarse, lo cual tiene una cierta importancia en función del destino de los frutos, bien sea para consumo fresco o para procesamiento industrial. La parte central del fruto o “*corazón*” puede estar muy o poco desarrollada y puede haber frutos con “*corazón vacío*” lo cual es un carácter negativo, o con “*corazón lleno*” (Brazanti, 1985).

Szczesniak y Smith (1969) mencionan que en el fruto de la fresa se pueden distinguir cinco zonas diferentes: 1) *epidermis* formada por células poligonales, largas y puntiagudas, que forman una pared densa a la cual se adhieren los estomas; 2) *hipodermis* formada por células meristemáticas que no cuentan con espacios intercelulares; 3) *corteza* o verdadera pulpa formada por células redondas con espacios intercelulares; 4) *xilema* y *floema* encargados de conducir agua, sales y nutrientes; y 5) *parénquima esponjoso* parte interna formada por células de pared delgada las cuales a menudo se separan durante el crecimiento del fruto, formando grandes cavidades (como se citó en Kader, 1991).

Los frutos de la fresa, según Brazanti (1985), pueden clasificarse de acuerdo a su forma en: cónicos, cónicos alargados, cónico-redondeados, esferoidales, oblatos y reniformes. La Universidad de California a través de la “Foundation Plant Services”, publicó una carta de formas de la fresa la cual propone ocho diferentes tipos de frutos (Figura 2-2).

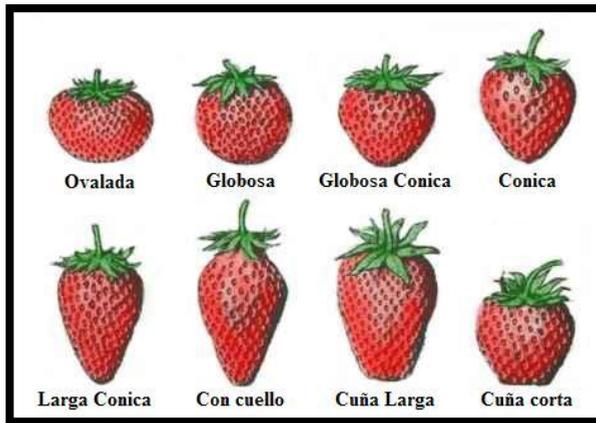


Figura 2-2. Carta de formas del fruto de la fresa. Foundation Plant Materials Service. Universidad de California.

2.1.2 Descripción fisiológica

Los productos agrícolas al momento de ser cosechados, están vivos y realizan procesos fisiológicos propios de organismos vivientes, desde el punto de vista poscosecha el más importante de todos estos es la respiración. El manejo poscosecha de productos agrícolas perecederos es básicamente el control de los factores internos y externos que contribuyen a intensificar el proceso de respiración y por ende la maduración (Manrique, 2000). La tasa de respiración de los frutos durante el proceso de maduración determinará si son frutos climatéricos o no. Como consecuencia de la respiración y los procesos metabólicos

involucrados, se pueden reconocer diferentes formas de cambios o pérdidas en los productos agrícolas:

1. Pérdida de agua
2. Redistribución de carbohidratos
3. Compuestos nitrogenados
4. Pérdida de clorofila y otros pigmentos
5. Cambios nutricionales

Los carbohidratos (polisacáridos) confieren a la pared celular dos importantes propiedades. La primera es la elasticidad de la pared, lo que permite que se pueda expandir durante el crecimiento celular, y la segunda es la rigidez, la cual confiere fuerza y determina la forma de la célula (Abbott y Harker, 2004). Los azúcares como la glucosa, fructosa y sucrosa son los principales componentes solubles presentes en la fresa madura y sus concentraciones dependen de las condiciones de crecimiento y el tipo de variedad (citado en Cordenunsi *et al.*, 2002).

La fresa es un fruto no climatérico ya que no es capaz de continuar su proceso de maduración una vez removido de la planta (Kader, 1999) mostrando una tasa respiratoria progresivamente lenta durante la senescencia (Manrique, 2000); mientras que los frutos climatéricos son capaces de seguir madurando incluso después de haber sido recolectados. Por esta razón la fresa debe ser cosechada en un estado de madurez óptimo para conseguir la máxima calidad en relación al sabor y color. Los principales cambios en la composición de la fresa son usualmente asociados con la maduración y estos toman lugar cuando el fruto está aún adherido a la planta madre. Estos cambios son altamente dependientes a la exposición a luz, temperatura, composición de la tierra y otras condiciones durante el manejo del cultivo (citado en Cordenunsi *et al.*, (2002). Su tasa de respiración es de moderada

a alta (cerca de $15 \text{ mg CO}_2/\text{kg}_{\text{FRESA}}/\text{h}$ a $0 \text{ }^\circ\text{C}$) e incrementa de cuatro a cinco veces a temperaturas de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ y su producción de etileno es baja siendo menor a $0,1 \text{ } \mu\text{l}/\text{kg}/\text{h}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (Kader, 1991).

Por otro lado, la planta de la fresa necesita acumular una serie de horas frío, con temperaturas por debajo de los $7 \text{ }^\circ\text{C}$ para dar una vegetación y fructificación abundante. Según su fisiología se tienen variedades de días neutros donde se da la floración y fructificación en temperaturas cálidas después de un enfriamiento; de días cortos, iniciando la floración y la latencia de la planta en respuesta a días menores de 12 horas a bajas temperaturas ($< 12 \text{ }^\circ\text{C}$) y de días infra cortos donde aparece una reanudación de la actividad vegetativa, se induce la floración y fructificación temprana en días largos y temperaturas nocturnas elevadas.

La planta de la fresa es un cultivo que se adapta muy bien a muchos tipos de climas. Su parte vegetativa es altamente resistente a heladas, llegando a soportar temperaturas de hasta $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, aunque los órganos florales quedan destruidos con valores algo inferiores a $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Al mismo tiempo son capaces de sobrevivir a temperaturas de hasta $55 \text{ }^\circ\text{C}$. Los valores óptimos, para una fructificación adecuada, se sitúan en torno a una temperatura media anual de 15 a $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

La influencia del suelo, tanto en su estructura física como en su contenido químico, es una de las bases para el desarrollo de la fresa la cual prefiere suelos equilibrados, ricos en materia orgánica, aireados, bien drenados, pero con cierta capacidad de retención de agua.

Algunos componentes químicos de la fresa y su contenido aproximado por 100 g de muestra son: el agua ($90,95 \text{ g}$), carbohidratos ($7,68 \text{ g}$), azúcares ($4,89 \text{ g}$), potasio

(153 mg), calcio (16 mg), magnesio (13 mg), fósforo 24 mg), sodio (1 mg), antocianinas (34 mg) y ácido ascórbico (61 mg), (Giampieri *et al.*, 2012). En el caso de los azúcares, antocianinas y ácido ascórbico, Cordenunsi *et al.* (2002) reportaron los valores de estos componentes químicos para seis variedades de fresa la cual fue clasificada en cinco grados de madurez: grado 1, poco verde; grado dos, $\frac{1}{2}$ de la superficie verde; grado 3, superficie completamente verde; grado 4, $\frac{1}{2}$ de la superficie color rojo y grado 5, $\frac{3}{4}$ de la superficie color rojo. Ellos encontraron, en el caso de los azúcares un incremento conforme madura el fruto. En algunas variedades encontraron un descenso en el contenido de azúcares del grado 5 al 6. La concentración de antocianinas se mantiene constante hasta el grado 3 presentado un considerable incremento del grado 3 al 5. Y finalmente, para el ácido ascórbico en algunas variedades se encontró un comportamiento similar al de los azúcares y en otras este tiende a ser constante o aumentar a partir del grado de maduración 3.

2.1.3 Recolección

El jornalero, más por experiencia que basándose en algún tipo de carta de color de la fresa, realiza la recolección cuando el fruto ha adquirido el color típico de la variedad, sobre $\frac{2}{3}$ o $\frac{3}{4}$ partes de la superficie, si se destina a mercados lejanos, a fin de que pueda resistir el transporte; o bien sobre toda la superficie coloreada si se destina a mercados locales o en caso de variedades de pulpa compacta y resistente. El operario, para arrancar el fruto, toma el pedúnculo entre los dedos índice y pulgar, ejerciendo una ligera presión con la uña y efectuando un rápido movimiento de torsión y corte, separando al fruto con una porción del pedúnculo (Figura 2-3).

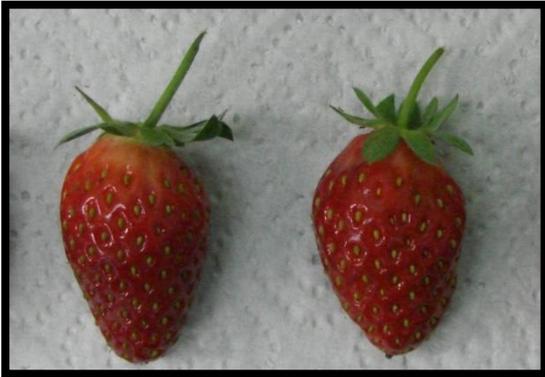


Figura 2-3. Fresa con porción de pedúnculo.

La separación del pedúnculo, en ocasiones, puede producirse con la extracción de una parte del corazón, que a veces saca también parte de la pulpa, lo que reduce el valor comercial de los frutos. El fruto del eje central primario de la planta es el primero en madurar y tiene mayores dimensiones que los de los ejes secundarios y terciarios; a veces es también más irregular en su forma, mientras que los otros tienen una forma más regular.

2.2 El concepto de la calidad en las frutas

La Real Academia Española define el término calidad como la “propiedad o conjunto de propiedades inherentes a algo, que permiten juzgar su valor”. La palabra calidad proviene del latín *qualitas*, que significa atributo, propiedad o naturaleza básica de un objeto. La calidad es una percepción compleja de muchos atributos que son evaluados simultáneamente en forma objetiva o subjetiva por el consumidor. Según Abbott (1999), el término calidad implica el grado de excelencia de un producto o su condición para un uso en particular. Bourne (2002), menciona cuatro principales factores que definen la calidad de un alimento:

- a. **Apariencia.** Comprende el color, forma, tamaño y brillo.

- b. **“Flavor”**. Comprende el sabor y el olor.
- c. **Textura**. Es la respuesta del sentido del tacto al estímulo físico que se da por el contacto entre alguna parte del cuerpo y el alimento.
- d. **Nutrición**. Se refiere a la cantidad de macro nutrientes (carbohidratos, lípidos y proteínas) y micro nutrientes (minerales, vitaminas y fibra).

Kader (1999) menciona que la calidad es el grado de excelencia o superioridad de un fruto, es una combinación de atributos, propiedades o características que dan a cada producto un valor en términos a las exigencias de los consumidores.

Por otro lado, Choi *et al.* (2001) mencionan que la calidad de las frutas puede clasificarse en externa e interna. Los aspectos externos (presentación, apariencia, uniformidad, madurez y frescura) son los componentes principales para la decisión de compra, la que normalmente es tomada cuando el consumidor ve los productos exhibidos en los locales de venta. La calidad interna (sabor, aroma, textura, valor nutritivo, ausencia de contaminantes bióticos y abióticos) está vinculada a aspectos generalmente no perceptibles pero no por ello menos importantes para los consumidores.

La apariencia (intensidad y distribución del color, forma, tamaño y ausencia de defectos) es un atributo primario que se evalúa al primer contacto visual y es importante en la evaluación de la calidad de las frutas y hortalizas. A menudo la apariencia de un producto es el factor principal para que sea adquirido por el consumidor seguido por la textura y el sabor (Mitcham *et al.*, 1996).

Por otro lado, la madurez es un término que se emplea en el manejo de frutas y hortalizas, y que se refiere de manera general al punto de máxima calidad

comestible. Watada *et al.*, (1984), la definieron como el conjunto de procesos que ocurren desde el estado inicial de crecimiento hasta el desarrollo, sin llegar a la senescencia, y que resulta en la calidad y estética del producto hortofrutícola. Como evidencia están los cambios en composición, color, textura y otros atributos sensoriales.

La maduración es la etapa del desarrollo de los productos hortofrutícolas cuyo propósito es lograr tanto la madurez fisiológica como la organoléptica (comercial). La primera es el estado de desarrollo cuando un fruto ha producido el máximo crecimiento y maduración, y la segunda cuando el fruto cumple con las características de calidad deseables por los consumidores (Kader, 1999).

Dentro de los parámetros que definen la madurez, el color, tanto en intensidad como en uniformidad, es el aspecto externo más fácilmente evaluado por el consumidor. El color, efectivamente, es un indicador de la madurez y muy importante en frutos en donde no hay cambios substanciales luego de ser cosechados. En frutos que sufren cambios luego de la cosecha el color es menos decisivo (López, 2003).

Kader (1991), menciona que la calidad de la fresa depende de su apariencia (intensidad y distribución del color rojo, forma y tamaño, sin defectos y daños), firmeza y sabor (determinado por la cantidad de azúcar, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos y volátiles).

En el mismo tenor, Mitcham (1996) presentó los factores más importantes de calidad para las fresas mencionando los siguientes: grado de madurez, brillo (índice de frescura y ausencia de pérdida de agua), ausencia de defectos, daños y

marchitamiento; y sabor (determinado por el contenido de azúcar, acidez y compuestos volátiles).

Algunas normas establecen los parámetros mínimos de calidad que debe tener la fresa tanto para su consumo en fresco como para su procesamiento. En la Tabla 2-2 se mencionan algunas normas, el país de origen y su objetivo.

Tabla 2-2.
 Normas de calidad a nivel nacional e internacional para la fresa.

Norma	País de origen	Objetivo
NMX-FF-062-SCFI-2002	México	Establece las especificaciones mínimas de calidad que deben cumplir los frutos de la fresa (<i>Fragaria x ananassa</i> , Duch) para ser comercializada y consumida en estado fresco.
Norma Española de calidad para fresas destinadas al mercado interior	España	Define las características de calidad de las fresas destinadas a ser entregadas en estado fresco al consumidor, en cualquier fase de su comercialización.
<i>United States Standards for grades of strawberries</i>	Estados Unidos de América	Establece los estándares de calidad que deben tener las fresas que los productores comercialicen.
<i>United States Standards for grades of grower's stock strawberries for manufacture</i>		Establece los estándares de calidad que deben tener las fresas que los productores entreguen a las empresas manufactureras.
<i>United States Standards for grades of washed and sorted strawberries for freezing</i>		Establece los estándares de calidad que deben tener las fresas después de someterse a procesos de lavado y clasificado, antes de ser congeladas.
<i>United States Standards for grades of frozen strawberries</i>		Establece los estándares de calidad que deben tener las fresas congeladas, tanto en trozos como en fruto completo.

Otros factores importantes que se deben considerar para asegurar la calidad de la fresa son la temperatura y su consumo inmediato. Es un fruto frágil, susceptible al daño mecánico y debido a su delgada piel pierde rápidamente agua en ambientes de baja humedad. En resumen, los principales factores que definen la calidad de la fresa son: grado de maduración según su color, brillo, ausencia de defectos y magulladuras, sabor, tamaño y uniformidad, firmeza y precio.

2.3 Propiedades que definen la calidad de la fruta

Como se ha mencionado los principales criterios utilizados para evaluar la calidad de frutas y hortalizas son la uniformidad en el color, firmeza, sabor y la ausencia de defectos, los cuales pueden ser medidos usando dos tipos de métodos: los descriptivos, que utilizan el análisis sensorial como medio para mostrar las características varietales; y los analíticos, que permiten medir ciertas particularidades del fruto.

Abbott (1999) clasifica a los métodos utilizados para evaluar la calidad de los frutos en base a las diferentes propiedades que presentan. Por ejemplo: las **propiedades electromagnéticas** (ópticas, fluorescencia y rayos X) son utilizadas para estudiar la apariencia y daños internos; las **propiedades mecánicas** (punción, pruebas cuasi – estáticas de fuerza/deformación, impacto y vibración) son utilizadas para estudiar la textura, la cual está relacionada con las características bioquímicas, fisiológicas y estructurales de los frutos; y las **propiedades electroquímicas** utilizadas para medir el sabor y el aroma. En las siguientes secciones hablaremos de las dos primeras propiedades, que son de interés para este trabajo.

2.3.1 Propiedades electromagnéticas. Color

Como se ha visto el color del fruto en sí es considerado por la mayoría de los consumidores como un indicador del estado de madurez y por lo tanto de su calidad.

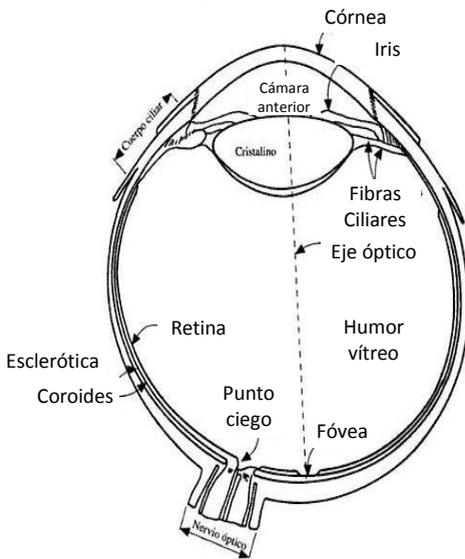


Figura 2-4. Diagrama simplificado de una sección transversal del ojo humano. González y Woods, 1996.

El color es una percepción visual que se genera en el cerebro al interpretar las señales nerviosas que le envían los foto receptores de la retina del ojo (Figura 2-4) y que a su vez interpretan y distinguen las distintas longitudes de onda ($380 < \lambda < 780 \text{ nm}$) que captan de la parte visible del espectro electromagnético (EEM). El cristalino absorbe aproximadamente el 8 % del espectro luminoso visible, con una absorción ligeramente superior en las longitudes de onda más cortas.

En el caso de la luz infrarroja y ultravioleta estas son absorbidas de forma apreciable por las proteínas que forman la estructura del cristalino puesto que en cantidades excesivas pueden dañar el ojo.

La membrana más interna del ojo es la retina, que recubre la totalidad de la pared posterior. Cuando el ojo está correctamente enfocado, la luz reflejada por un objeto exterior al ojo, forma su imagen en la retina. La visión del objeto se debe a dos clases de receptores: los conos y los bastones. Los primeros están localizados en la región central de la retina, denominada fóvea, y son muy sensibles al color (rojo, verde y azul); los seres humanos podemos apreciar detalles relativamente finos gracias a estos conos; mientras que los bastones sirven para dar un panorama general del campo de visión (González y Woods, 1996).

Por otro lado, todo cuerpo iluminado absorbe una parte de las ondas electromagnéticas y refleja las restantes. Las ondas reflejadas, como se mencionó, son captadas por el ojo e interpretadas en el cerebro como colores según las longitudes de onda correspondientes. El espectro electromagnético abarca asimismo, otro tipo de radiación como la luz ultravioleta, rayos X y rayos gamma, con menor longitud de onda (λ) que la luz visible y otro tipo de radiación con longitudes de onda mayores que los de la luz visible como los rayos infrarrojos, microondas y ondas de radio (Figura 2-5).

Dentro de las propiedades electromagnéticas, las ópticas se refieren a la respuesta de la materia cuando es expuesta a la luz visible, y que abarca, dentro del EEM, longitudes de onda que van desde los 400 (violeta) hasta los 700 nm (rojo), aproximadamente, y su uso se ha extendido incluso a los rayos ultravioleta (UV) que van desde los 4 hasta los 400 nm, aproximadamente y al infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) que abarca λ desde los 700 hasta los 2500 nm, aproximadamente.

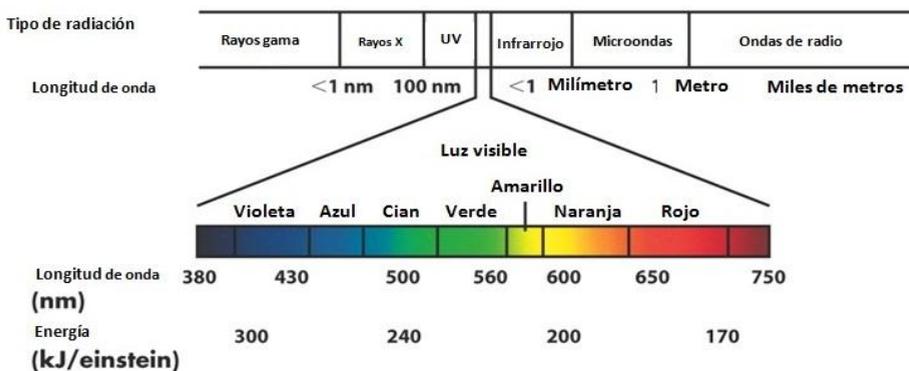


Figura 2-5. Espectro electromagnético. www.concursoespacial.com/tematicoLaTierra2_1.asp.

Las propiedades ópticas se basan en fenómenos como la reflexión, refracción y difracción, además de transmisión, absorción y emisión de la luz por los materiales en general, incluyendo los tejidos biológicos (Figura 2-6).

Existen dos factores fundamentales en la interacción luz-materia:

- Factores geométricos.- Dependen de las dimensiones y estructura de la materia y sus partículas, y de la longitud de onda de la radiación empleada.
- Factores de absorción.- La radiación es absorbida en cantidades discretas o “cuantos” y las moléculas que la absorben quedan excitadas. Cuando se trata de luz visible o ultravioleta, las moléculas absorben la radiación porque los electrones pueden subir a estados de energía superiores. La luz infrarroja no tiene tanta energía como para excitar electrones, en este caso la excitación resulta en la vibración y rotación de las moléculas (Valero, 2001).

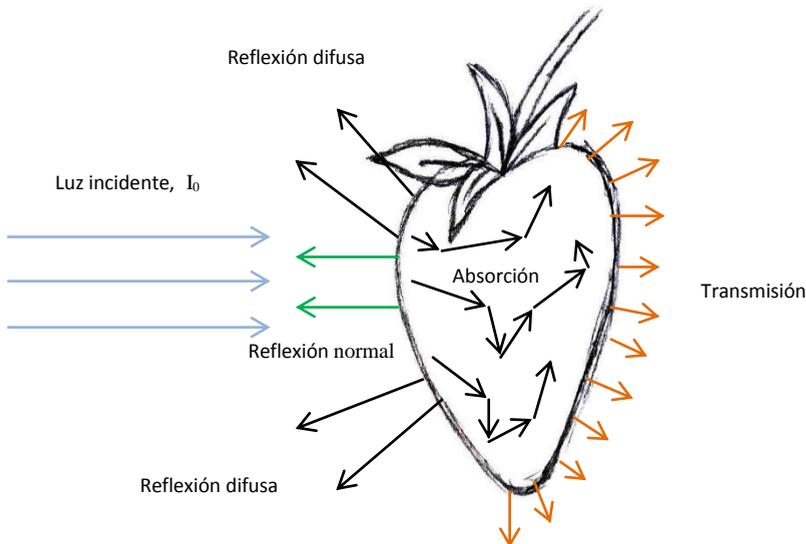


Figura 2-6. Comportamiento de la luz incidente en un fruto. Con datos de Valero, 2001.

La luz reflejada por un objeto, y que reconocemos como color es, en general, una mezcla de luz a varias longitudes de onda dentro de la región visible del EEM. Cuando un fruto es expuesto a la luz, cerca del 4 % de la luz incidente es reflejada fuera de la superficie causando reflexión especular o lo que se conoce como luminosidad y el 96 % es transmitida a través de la superficie hacia el interior de la estructura celular del producto, la cual es esparcida por pequeñas interfaces dentro del tejido o absorbida por los constituyentes celulares (Abbott, 1999).

El color superficial de las frutas se debe a la presencia de varios pigmentos en la cáscara y en la pulpa que tienen la propiedad de absorber longitudes de onda en el rango visible (Crisosto, 1994). La cuantificación de estos pigmentos tiene un gran interés para el estudio de los procesos fisiológicos relacionados con la maduración en frutos. Moléculas como el agua, hidratos de carbono, lípidos y proteínas absorben longitudes de onda ubicados en la región NIR (Abbott, 1999).

En la Figura 2-7 se muestran los espectros de absorción de algunos pigmentos vegetales como la clorofila y los carotenoides. En el caso de estos últimos, se puede observar que hay una mayor absorción de luz en longitudes de onda entre los 400 y 500 nm y una reflexión de la luz en longitudes de onda que abarcan los 550 a los 700 nm, lo que explica el hecho de que los carotenoides son los responsables de los colores amarillo, anaranjado y rojo presentes en la mayoría de los frutos.

Algunas investigaciones han desarrollado prototipos para medir la cantidad de clorofila presente en frutos como la manzana y los melocotones. Este pigmento está íntimamente relacionado con el estado de madurez y con el momento óptimo para llevar a cabo la cosecha (Bodria *et al.*, 2004).

Las antocianinas y los factores que afectan su síntesis y estabilidad son responsables del color de la fresa (Holcroft y Kader, 1999). Estos pigmentos solubles en agua están localizados en las vacuolas y confieren un rango de colores que van desde el color púrpura hasta el rojo (Gil *et al.*, 1997), presentando su máxima absorción de luz en longitudes de onda que van de los 500 a los 600 nm.

Nunes *et al.*, (2006) llevaron a cabo mediciones del total de antocianinas (TA) presentes en tres variedades de fresa 'Sweet charlie', 'Oso grande' y 'Chandler' obteniendo como resultado un incremento significativo en el contenido del TA durante la maduración de la fresa tanto en el campo como en el almacenamiento. Como se mencionó, Cordenunsi *et al.*, (2002), estudiaron la influencia del tipo de variedad y el grado de madurez en el contenido de antocianinas, encontrando un incremento considerable de estos pigmentos, entre los grados de madurez 4 (½ de la superficie color rojo) y 5 (¾ de la superficie color rojo), lo cual está asociado con el proceso de maduración. La cantidad de antocianinas para cada una de las variedades utilizadas en este estudio estuvo en el rango de 13 a 55 mg/100 g de fruta en el nivel de grado de madurez cinco.

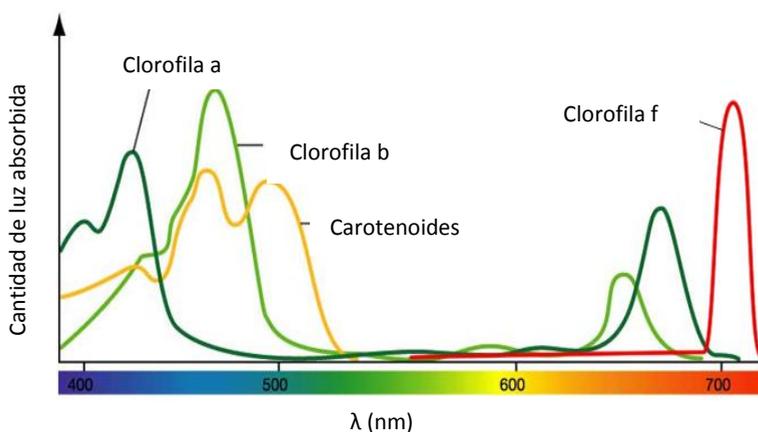


Figura 2-7. Espectros de absorción de algunos pigmentos vegetales. <http://es.reefbuilders.com/>

El color posee tres elementos principales: tono o matiz (longitud de onda dominante), brillo o claridad (luminosidad) y saturación (cantidad de color). El tono se refiere al grado en el cual un estímulo puede ser descrito como similar o diferente a las clasificaciones de rojo, amarillo, verde, azul, etc. En base a su luminosidad (claridad) los colores pueden ser clasificados en colores claros y oscuros, y finalmente la saturación se refiere a los colores mates (apagados) o intensos (vivos). La percepción del color depende del tipo e intensidad de la luz, del efecto de contraste (fondo claro u oscuro), de las características direccionales del color, de la sensibilidad visual de cada individuo, del efecto de área y de las características fisicoquímicas del producto (Comunicación precisa del color, KONICA MINOLTA, 1998).

Las técnicas utilizadas para medir el color de los materiales biológicos se pueden clasificar en subjetivas y objetivas. Para la medición subjetiva del color se usan guías o cartas de color que son útiles para clasificar, de acuerdo a su grado de madurez, a frutos como la uva (Kondou *et al.*, 1998), fresa, banana, y nectarina; y vegetales como el jitomate. Dichas cartas se basan en las diferentes tonalidades que presenta el fruto conforme alcanza su madurez ya sea fisiológica u organoléptica (comercial). Algunas compilaciones se han realizado al respecto como “Produce quality rating scales and color chart” (Kader y Cantwell, 2010) editado por el Centro de Investigaciones e Información en Tecnología Poscosecha de la Universidad de Davis, California y en la cual se muestran escalas de clasificación y cartas de color para diferentes tipos de frutas y vegetales. El Centro Interprofesional de Frutas y Hortalizas (Ctifl, por sus siglas en francés) ubicado en París, Francia, elabora códigos de color para frutos como la fresa.

Para las mediciones objetivas, y con el propósito de cuantificar el color, los investigadores han desarrollado sistemas de referencia del color basados en los tres elementos mencionados: tono, brillo y saturación. Uno de estos sistemas es el espacio de color de los **valores triestímulo XYZ** el cual está basado en la teoría de los tres componentes de la visión del color, que establece que el ojo posee receptores para los tres colores primarios (rojo, verde y azul) y que todos los demás colores se ven como mezclas de estos tres colores primarios. La Comisión Internacional de Iluminación (CIE, por sus siglas en francés) definió que el observador estándar calcula los valores triestímulo a través de tres funciones de coincidencia de color: $\bar{x}(\lambda)$ alta sensibilidad en la región de longitud de onda del color rojo, $\bar{y}(\lambda)$ gran sensibilidad en la región de longitud de onda del color verde y $\bar{z}(\lambda)$ elevada sensibilidad en la región de longitud de onda del color azul (ver Figura 2-8). Los valores triestímulo XYZ son calculados usando estas funciones de coincidencia de color mediante las siguientes formulas:

$$X = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) R(\lambda) d\lambda , \quad (1)$$

$$Y = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) R(\lambda) d\lambda , \quad (2)$$

$$Z = K \int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) R(\lambda) d\lambda , \quad (3)$$

$$K = \frac{100}{\int_{380}^{780} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} , \quad (4)$$

donde:

$S(\lambda)$: Distribución de potencia espectral relativa del iluminante; $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$: Funciones de coincidencia de color; $R(\lambda)$: Reflectancia espectral del espécimen y K : factor de normalización.

Las funciones de coincidencia de color son los valores triestímulo del espectro de igual energía en función de la longitud de onda. Estas funciones se han concebido para que correspondan con la sensibilidad al color por parte del ojo humano. Esta sensibilización cambia dependiendo del ángulo de vista (tamaño del objeto). Las funciones de coincidencia de tres colores para el observador estándar de 2° (ángulos de visualización de 1° a 4°) y observador estándar suplementario de 10° (ángulos de visualización de más de 4°) que se observan en la Figura 2-8 son el resultado de diferentes proporciones (estímulos) de $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ y $\bar{z}(\lambda)$ en la luz recibida de un objeto.

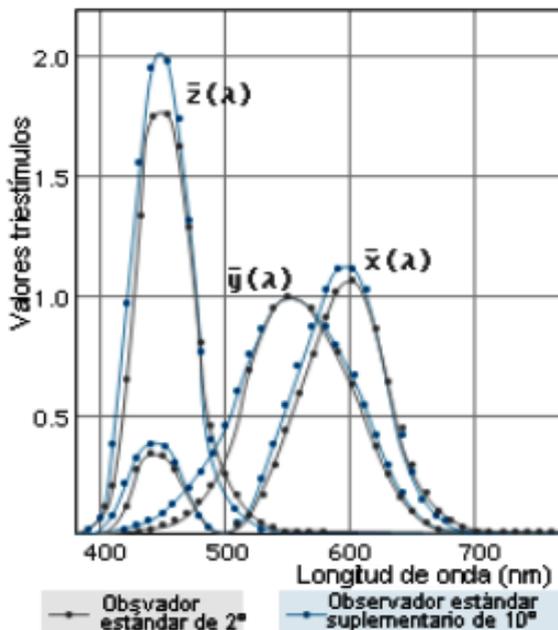


Figura 2-8. Funciones de coincidencia de color. Konica Minolta 2003.

Un segundo sistema es el **espacio de color $L^*a^*b^*$** que actualmente es uno de los más usados para medir el color de frutos. En este espacio la variable L^* indica la luminosidad, donde $L^* = 0$ representa el negro y $L^* = 100$ el blanco absoluto y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 , \quad (5)$$

a^* y b^* son la coordenada de cromaticidad cuyo cálculo es a partir de las siguientes ecuaciones:

$$a^* = 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] , \quad (6)$$

$$b^* = 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] , \quad (7)$$

Donde:

X, Y, Z: valores triestímulos XYZ del espécimen

X_n , Y_n , Z_n : valores triestímulos XYZ de un difusor reflectante perfecto

En la Figura 2-9 podemos observar las direcciones para cada una de estas variables. L^* , como ya se mencionó se refiere a la luminosidad y abarca del blanco al negro, $+a^*$ indica rojo y $-a^*$ verde, mientras que $+b^*$ indica amarillo y $-b^*$ azul. Los valores de la coordenada de cromaticidad están comprendidos entre + 127 y -128.

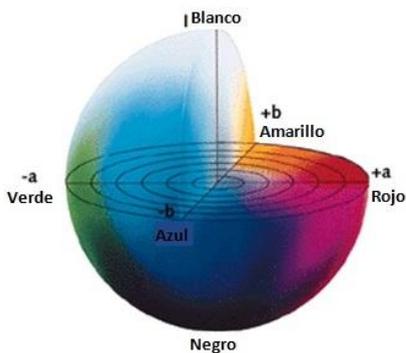


Figura 2-9. Espacio de color CIE $L^*a^*b^*$.
Comunicación Precisa de los Colores.
Konica Minolta, 2007.

En éste espacio de color $L^*a^*b^*$ la diferencia de color entre dos muestras puede expresarse como un valor numérico sencillo ΔE^*_{ab} que indica el grado de diferencia de color pero no la dirección. ΔE^*_{ab} se define mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta E^*_{ab} = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}, \quad (8)$$

Donde ΔL^* , Δa^* y Δb^* son las diferencias entre el colores del espécimen y el de referencia. Si el número obtenido es cercano a 1, se considerará que son muestras idénticas.

El **espacio de color $L^*C^*h^*$** el cual usa el mismo diagrama que el espacio CIE $L^*a^*b^*$ pero en coordenadas polares, no rectangulares. En este espacio L^* indica luminosidad, C^* es el valor cromático que en el centro es igual a cero e incrementa conforme se aleja y h^* es el ángulo de tono métrico: iniciando a partir del eje $+a^*$ y expresado en grados: 0° corresponde a rojo, 90° amarillo, 180° verde y 270° azul (Figura 2-10).

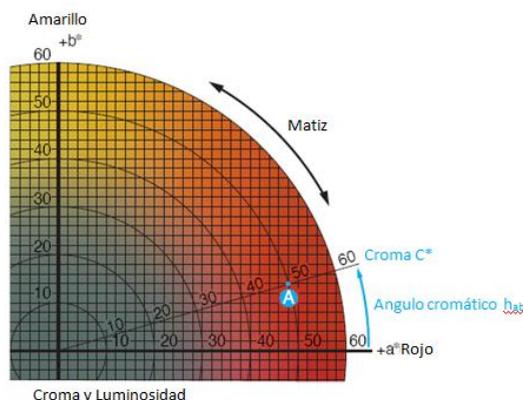


Figura 2-10. Espacio de color $L^*C^*h^*$. Comunicación Precisa de los Colores. Konica Minolta, 2007.

Para el caso del espacio de color CIE Lab, se han elaborado algunos diagramas a diferentes valores de Luminosidad (L^*), con el propósito de ubicar en el espacio los valores de la coordenada de cromaticidad a^* , b^* . En el Anexo 1, se muestra un diagrama (escala de color) de este tipo, donde es posible para $L^* = 50$ conocer el color exacto cuando se tienen los valores de a^* y b^* .

Los espectrofotómetros (Figura 2-11) son instrumentos utilizados para medir el color de la superficie en frutas y hortalizas en base a las características espectrales de luz y a continuación calculan los datos numéricos en varios espacios de color, como el CIE Lab. Estos cuentan con múltiples sensores que una vez que reciben la luz (en el rango de la luz visible) emitida por el objeto, la transmiten como información a una microcomputadora generando un valor específico a cada variable. Estos instrumentos se basan en la cantidad de luz reflejada o absorbida por la superficie del producto. En el capítulo 4, hablaremos en detalle del funcionamiento de este tipo de instrumento.

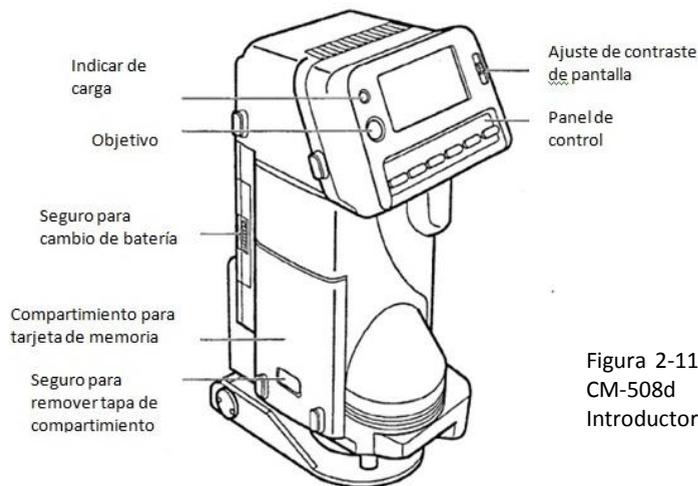


Figura 2-11. Espectrofotómetro. Modelo CM-508d marca Minolta. Manual Introductorio Minolta

Algunos trabajos de investigación han reportado los valores de L^* , a^* y b^* para diferentes variedades de fresa. Por ejemplo, Carballo *et al.*, (2006) reportaron valores promedio de la coordenada de cromaticidad a^* , b^* , para las variedades 'Araza', 'Camarosa' y 'Ventana', de 47,6 y 34,5, 33,9 y 27,3 y 60,2 y 20,0, respectivamente. Gil *et al.*, (1997) midieron el color de la piel de fresas de la variedad 'Selva' obteniendo valores promedio de L^* igual a 36,4. Utilizando la misma variedad Holcroft y Kader (1999) obtuvieron valores de L^* entre 35 y 38.

Alcántara (2009), en su tesis de doctorado reportó, durante la recolección de fresas de la variedad 'Chandler' y 'Camarosa', valores promedio de L^* de 31,40 y 31,13, de a^* 30,17 y 25,54 y de b^* 28,49 y 16,09, respectivamente.

Estas diferencias se deben a diferentes factores, que pueden afectar los resultados obtenidos, como son el tipo de variedad, la pérdida de humedad, rugosidad de la superficie, temperatura, así como el contenido y concentración de antocianinas.

2.3.2 Propiedades eléctricas de los tejidos biológicos. Impedancia Bio-eléctrica

Las propiedades eléctricas de los tejidos biológicos y de las suspensiones celulares determinan la manera en que una corriente eléctrica fluye a través de estos. El conocimiento de estas propiedades puede llevar al entendimiento de procesos biológicos fundamentales (Miklavčič *et al.*, 2006).

Hace más de tres décadas Moshenin (1986) mencionó que las propiedades eléctricas de los productos agrícolas, como la conductividad, capacitancia, propiedades dieléctricas y el comportamiento a la radiación electromagnética, son

importantes durante el manejo y procesamiento de dichos productos. El estudio de estas propiedades ha sido útil en la determinación de la humedad en granos y en la separación y limpieza de semillas. La técnica de impedancia puede usarse por ejemplo, para determinar el grado de daño en tejidos debido a las heladas o a envenenamiento por aspersión.

Los organismos vivos están compuestos de células que se unen entre sí mediante una matriz extracelular o bien por adhesión directa de una célula con otra formando distintos tipos de uniones. Estas células son sensibles al calor, presión y a otros tipos de estímulos. El principal componente de las células es la membrana celular con la cual, la célula, puede controlar el paso de componentes del exterior a su interior, esto debido a la permeabilidad diferencial y selectividad de iones de la membrana (Salazar, 2004).

Algunas características de la membrana celular es que su grosor es de aproximadamente 7 nm, tiene una capacitancia eléctrica del orden de $20 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ y su estructura (Figura 2-12) se basa en una bicapa lipídica en la cual se encuentran distribuidas las proteínas, organelos de transporte y canales iónicos que permiten el intercambio con el exterior a través de fenómenos como difusión (ósmosis y diálisis) y los que están relacionados a las corrientes eléctricas (Grimnes y Grottem, 2000).

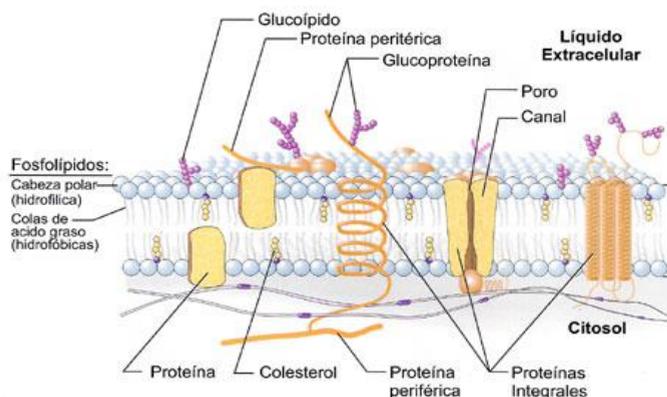


Figura 2-12. Estructura de la membrana celular.

<http://toxamb.pharmacy.arizona.edu/c1-1-2-1.html>

Por sus componentes moleculares, la membrana celular actúa como una interfase dieléctrica. Por lo tanto, los iones cargados eléctricamente se mueven, cuando se aplica un campo eléctrico constante y se acumulan en ambos lados de la membrana. Cuando el campo es alterno, al aumentar la frecuencia, aparecen corrientes de desplazamiento a través de la pared celular, produciendo un fenómeno de relajación resultado de la polarización de varios dipolos y del movimiento de las cargas que inducen un fenómeno de conducción.

Por otro lado, las agrupaciones celulares dan lugar a los tejidos quedando entre ellas espacios llenos por el líquido extracelular. Estos tejidos son materiales no homogéneos y las células que los conforman son de diferentes tamaños y funciones. Cada una de esas estructuras y regiones poseen propiedades eléctricas muy particulares que, dependiendo de su constitución y estado, determinan la conducta de la permitividad relativa (ϵ') y la conductividad eléctrica (σ'), en función de la frecuencia del estímulo eléctrico (Casañas, 2003).

La permitividad relativa de los materiales dieléctricos es una medida de la capacidad de un material para almacenar energía electromagnética. Funebo y Ohlsson (1998) midieron la ϵ' de manzanas, perifollo, champiñones, perejil y fresa con el objetivo de conocer el efecto de la temperatura y contenido de humedad en las propiedades dieléctricas de estos productos, encontrando que la ϵ' disminuye con el aumento de la humedad y aumenta con el incremento de la temperatura.

Por otro lado, la conductividad eléctrica es la capacidad de un material para permitir el flujo de la corriente eléctrica. Los mejores conductores son la plata, el cobre, el oro y el aluminio (Tippens, 1991). Jiang *et al.*, (2001), estudiaron la σ' de la fresa con el objetivo de relacionarla con el daño durante su manejo manual y

durante el transporte (daño por vibraciones), encontrando una relación positiva entre la conductividad eléctrica y el daño de las fresas, por lo que la aplicación de la σ' puede ser una alternativa para realizar una inspección de la calidad de productos hortofrutícolas. Sarang *et al.*, (2008) reportaron que los duraznos (melocotones) y las fresas tienen una mayor conductividad eléctrica que frutos como las manzanas, peras y piñas.

Las características eléctricas de los tejidos están determinadas por tres efectos diferentes. Por una parte, las características de las células ya sean sus propiedades eléctricas o la integridad y normalidad de las mismas, por otra parte, la variación de los volúmenes de los medios extra e intracelular; y finalmente los efectos de doble capa que surgen al tratar con agrupaciones de elementos celulares, como es el caso de los tejidos biológicos (Rigaud *et al.*, 1996).

Los tejidos biológicos poseen una impedancia eléctrica compleja relacionada, entre otros factores, con su estructura interna y su porcentaje de agua libre y ligada (Irastorza *et al.*, 2007). Asimismo, estas propiedades eléctricas dependen de la orientación relativa del tejido con respecto al campo aplicado (anisotropía direccional) y de la frecuencia del campo aplicado (los tejidos no son dieléctricos perfectos o conductores perfectos) o pueden ser dependientes del tiempo y del espacio.

Por otro lado, las células contienen y están rodeadas por electrolitos acuosos. En los frutos los electrolitos más comunes son: K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- y el HCO_3^- y son responsables de producir una conductividad electrolítica. El análisis de la impedancia bio-eléctrica puede proporcionar información acerca de los cambios fisiológicos dentro y fuera de las células, y sobre las membranas.

Las propiedades eléctricas de cualquier material, incluyendo los tejidos biológicos, pueden ser clasificadas, según su comportamiento, en dos categorías: conductores y aislantes (dieléctricos). En un conductor perfecto, las cargas eléctricas se mueven libremente cuando se aplica un campo eléctrico, mientras que en un aislante perfecto las cargas están fijas y no se mueven libremente.

El estudio de las propiedades eléctricas ha sido importante en el área biomédica usándose en la estimulación eléctrica-funcional, en hipertermia por radio frecuencia, en el diagnóstico y tratamiento de varias condiciones fisiológicas, en la electrocardiografía y en el estudio de la composición del cuerpo usando corrientes débiles de electricidad, (Miklavčič *et al.*, 2006).

La impedancia bio-eléctrica ha sido importante en los estudios relacionados con la electrofisiología y la biofísica y es la oposición que presenta un cuerpo, en nuestro caso un tejido biológico, al paso de una corriente alterna a través de él. Esta propiedad inherente a los materiales se puede utilizar para caracterizar los tejidos biológicos de manera no invasiva. La impedancia eléctrica (medida en Ohms) es expresada por la ecuación 9 donde R_s es la resistencia (parte real de la impedancia), X_s es la reactancia (parte imaginaria de la impedancia) y j es un número imaginario:

$$Z^* = R_s - jX_s , \quad (9)$$

o bien, se puede expresar a través de la siguiente ecuación:

$$Z^* = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} , \quad (10)$$

Donde R^2 es la resistencia, X_L es la reactancia inductiva y X_C es la reactancia capacitiva.

El estudio de la impedancia bio-eléctrica basado en el modelo de impedancia Cole-Cole para determinar las características de sistemas y tejidos biológicos permite la obtención del espectro de impedancia (Figura 2-19) del material biológico. El valor de la impedancia, como se mencionó, presenta un componente real y uno imaginario y ambos reflejan el comportamiento de las propiedades eléctricas pasivas de los tejidos. La parte real está relacionada con el comportamiento resistivo de los medios intra y extracelular y la parte imaginaria con el comportamiento capacitivo de la membrana celular (Muñoz *et al.*, 2006).

De manera general, la técnica para medir la impedancia bio-eléctrica consiste en poner en contacto directo electrodos con la muestra en estudio. A estos electrodos se les aplica una señal armónica de voltaje con una amplitud del orden de los milivoltios y cuya frecuencia (ω) se hace variar, generalmente entre varios milihercios y algunos Megahercios, detectando la corriente que circula por el circuito formado entre los electrodos y el material biológico para analizar e interpretar la impedancia compleja Z^* del sistema (Morales *et al.*, 2010).

El material de los electrodos puede ser de plata (Ag), platino (Pt), plata / cloruro de plata (Ag/AgCl), cobre o acero inoxidable; cuyo número, tamaño y separación pueden variar dependiendo de lo que se desee medir. La distancia entre electrodos así como las dimensiones de los mismos, determinara la profundidad de la medición. Esta distancia entre electrodos debe satisfacer la condición de que la separación será mucho más grande que el diámetro del electrodo y lo

suficientemente pequeña para despreciar la curvatura del fruto (Montoya *et al.*, 1994). En la Figura 2-13 se muestran algunas configuraciones típicas usadas.

En algunas mediciones para asegurar el contacto eléctrico entre la muestra y los electrodos, se utiliza gel conductor, debido a que minimiza el riesgo de una deficiente medición por un inadecuado contacto entre los electrodos y la muestra, y debido a su carga neutra hace poco probable que haya interacciones con compuestos presentes en las muestras (Vozáry y Benko, 2010).

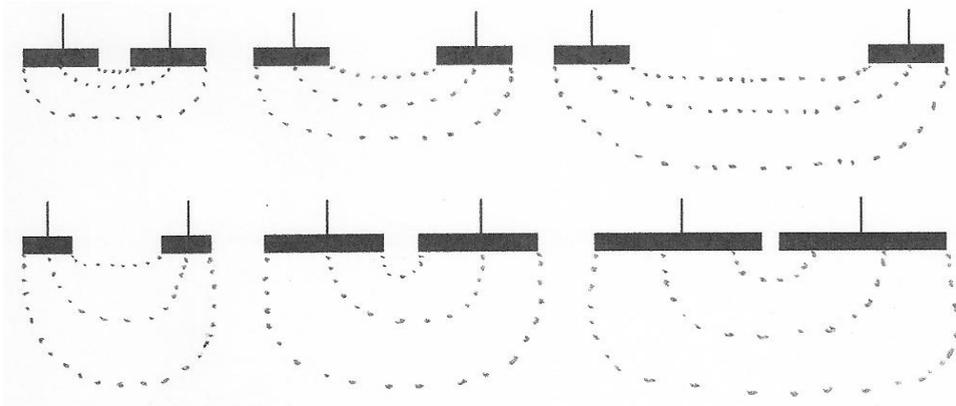


Figura. 2-13. Diferentes profundidades de medición en función de la distancia y tamaño de los electrodos. Grimnes y Grottem, 2000.

La polarización de los electrodos puede presentarse durante la medición de las propiedades eléctricas de los tejidos, *in vivo*. Este fenómeno, es una manifestación de la organización de las cargas moleculares que ocurre en la interfase muestra-electrodo en presencia de moléculas de agua e iones hidratados y puede ser modelado como un capacitor dependiente de la frecuencia en serie con un resistor.

Debido a las propiedades eléctricas de los materiales, la impedancia de los tejidos biológicos cambia con la frecuencia por lo que para caracterizar la impedancia, se hace un barrido en frecuencias.

Cuando el valor de la impedancia cambia rápidamente en un pequeño rango de frecuencias, se dice que existe una región de dispersión.

En la Figura 2-14 se muestran las tres principales regiones de relajación o dispersión llamadas α , β y γ , que presentan los tejidos biológicos y donde se puede observar la variación de la permitividad relativa (ϵ') y la conductividad eléctrica (σ') en función de la frecuencia. A bajas frecuencias la permitividad es relativamente alta mientras que la conductividad es baja. Conforme aumenta la frecuencia la ϵ' va disminuyendo y la σ' aumenta (Miklavčič *et al.*, 2006)

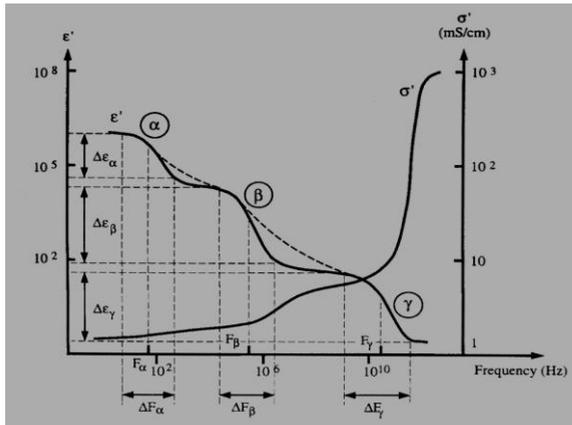


Figura. 2-14. Representación ideal de la permitividad y resistividad de los tejidos biológicos en función de la frecuencia. Citado en Miklavčič *et al*, 2006.

En la gráfica anterior, ΔF y $\Delta\epsilon$ para las dispersiones α , β y γ , se refiere a las variaciones en la frecuencia y en la permitividad, respectivamente, donde se observa una región de relajación.

Estas dispersiones son debido a que las propiedades eléctricas de los materiales biológicos no son constantes, ya que varían con la frecuencia y dependen del grado de orientación de los dipolos y del movimiento de los transportadores de cargas. Para frecuencias menores a 10 kHz la dispersión α es causada por fenómenos de difusión iónica de los iones que envuelven a la membrana celular. La célula es poco conductora comparada con el medio extracelular. La dispersión β ocurre en los rangos de frecuencia en MHz originando una polarización de interfase en la membrana celular la cual actúa como una barrera para los transportadores de iones pasivos entre el interior y exterior de los medios de comunicación celular. Básicamente la membrana puede ser modelada como una combinación paralela de un capacitor con una resistencia. Aquí el campo eléctrico externo comienza a penetrar el interior de la célula además de la polarización de las proteínas y macromoléculas. La dispersión β , es la que está más estrechamente relacionada con las propiedades de la membrana celular y con la forma de agrupación de las células para formar los diferentes tejidos (Salazar, 2004). Finalmente en los rangos de los GHz (10^9 Hz) la dispersión γ es causada por la polarización del agua. Para más información al detalle ver Miklavčič *et al.* (2006).

Para estudiar la impedancia bio-eléctrica de un tejido en particular se requiere obtener los valores de cuatro parámetros (R_0 , resistencia a baja frecuencia; R_∞ , resistencia a alta frecuencia, τ , tiempo de relajación¹ y α , coeficiente de dispersión). Para esto, se requiere de un analizador de impedancia que mida la impedancia del tejido. Algunos métodos extraen los parámetros de la gráfica que relaciona la parte imaginaria de la impedancia Z'' con la real Z' , Figura 2-19. Sin embargo, con los programas actuales la mayoría de estos parámetros se estiman utilizando el método no lineal de los mínimos cuadrados (Maundy y Elwakil, 2012).

¹ Véase Anexo 19

Los modelos de circuitos eléctricos permiten interpretar espectros de impedancia en términos de estas variables eléctricas (resistencia, capacitancia y elementos de fase constante) asociados con la estructura a nivel celular (Bauchot *et al.*, 2000). Estos modelos eléctricos denominados “modelos de parámetros concentrados” permiten una interpretación física o fisiológica de la impedancia.

En la Figura 2-15 se muestra un diagrama de un circuito eléctrico simple, formado por las resistencias a alta y baja frecuencia, R_E y R , respectivamente y Q , elemento de fase constante relacionado con la capacitancia y grado de homogeneidad de la muestra, el cual ha permitido simular datos experimentales de algunas interfaces metal desnudo – electrólito cuya impedancia viene dada por:

$$Z^* = R_E + \frac{RQ}{R+Q} \quad , \quad (11)$$

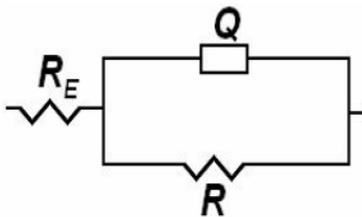


Figura 2-15. Circuito simple $R_E(RQ)$. Resistencia a alta frecuencia (R_E), elemento de fase constante (Q) y resistencia a baja frecuencias (R). Morales *et al*,

Existen otras representaciones de modelos eléctricos, como son los modelos que cumplen con la ecuación de permitividad compleja de Debye:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad , \quad (12)$$

Donde $\varepsilon^*(\omega)$ es la permitividad en función de la frecuencia, ε_∞ y ε_s son la permitividad a alta y baja frecuencia, ω la frecuencia y τ es la frecuencia característica del tejido o tiempo de relajación.

En la Figura 2-16 se muestran diferentes tipos de circuitos eléctricos que representan la ecuación de Debye, donde R_1 y R_2 son las resistencias a alta y baja frecuencia, respectivamente y C_1 la capacitancia.

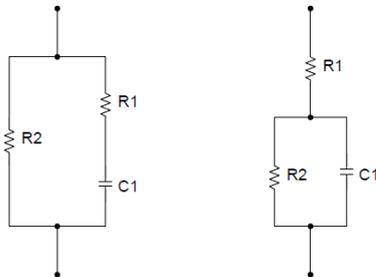


Figura 2-16. Diagramas de circuitos eléctricos que representan la ecuación de Debye. R_2 , resistencia a baja frecuencia y R_1 resistencia a alta frecuencia.

La siguiente Figura muestra tres modelos de parámetros concentrados. Como se mencionó estos modelos son usados para separar la impedancia del tejido en los componentes resistivos y reactivos asociados a la estructura celular. Por ejemplo el modelo A proporciona valores de la resistencia celular (R_1), resistencia del citoplasma (R_2), resistencia de la vacuola (R_4), capacitancia de la membrana plasmática (C_3) y capacitancia del tonoplasto (C_5).

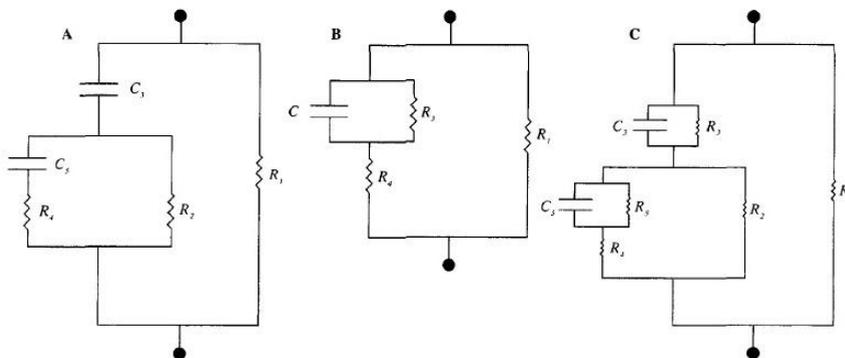


Figura 2-17. Diagramas de circuitos usados para modelar el flujo de corriente a través del tejido del caqui. (Harker y Forbes, 1997). Estos diagramas incluyen los siguientes componentes: resistencia de la pared celular (R_1), resistencia del citoplasma (R_2), resistencia de la vacuola (R_4) capacitancia de la membrana plasmática (C_3), capacitancia del tonoplasto (C_5). En el modelo B, R_1 y R_4 son las resistencias intra e intercelular, y C capacitancia de la membrana. En el modelo C, R_3 y R_5 , resistencias de la membrana plasmática y del tonoplasto, respectivamente.

Algunos trabajos preliminares se llevaron a cabo para realizar mediciones en células sanguíneas, músculo, hígado de conejillo de indias y papas usando el método de “*vacuum tube ammeter – voltmeter*” aplicando un rango de frecuencia de 500 Hz a 3 MHz. Los resultados fueron representados en términos de un circuito eléctrico (Figura 2-18) en el cual R_i representa la resistencia del interior de la célula y R_m y C_m la resistencia y capacitancia de la membrana, ignorando cualquier flujo de corriente alrededor y entre las células (Cole, 1972).

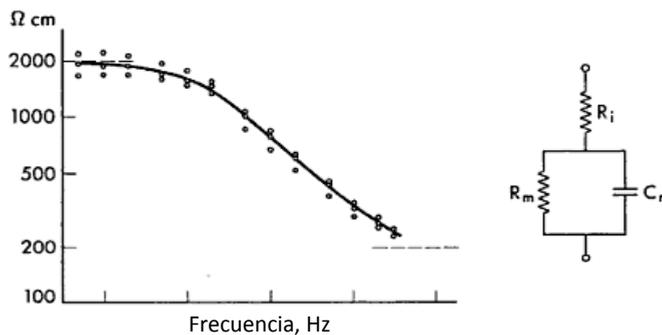


Figura 2-18. a) Impedancia específica del hígado de conejillo de indias, b) Circuito equivalente propuesto para varios tejidos. Resistencia del interior de la célula (R_i), resistencia de la membrana (R_m) y capacitancia de la membrana (C_m). Cole, 1972.

Básicamente y como se mencionó, la membrana puede ser modelada como una combinación paralela de un capacitor y un resistor.

En la Figura 2-19 se muestra el espectro de impedancia (arco circular) obtenido durante la medición de la impedancia Z en fresas de la variedad ‘Sweet charlie’ y la cual está formada por una parte imaginaria (reactancia, Z'') y una real (resistencia, Z'). La parte imaginaria (eje de las ordenadas) representa las propiedades inductivas y capacitivas del material y la parte real (eje de las abscisas) está asociada con la resistencia eléctrica del material. A partir de este gráfico es posible obtener los valores de R_s (R_∞) y R_p (R_0), variables relacionadas con la resistencia intra y extracelular, respectivamente. A partir del ángulo de fase φ_{CPE} se obtienen

los valores de CPE- P, variable relacionada con el grado de homogeneidad de la muestra y CPE – T relacionada con la estructura de las membranas celulares.

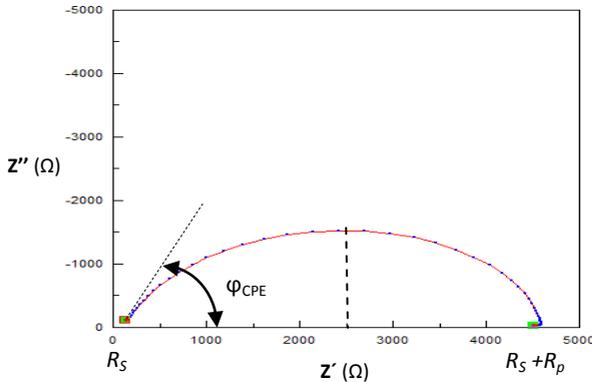


Figura 2-19. Espectro de impedancia típico de fresas de la variedad ‘Sweet charlie’. (Elaborado con datos propios)

Varios modelos eléctricos (Figuras 2-16, 2-17 y 2-20) han sido propuestos para explicar este arco. En la Figura 2-20, se muestra el modelo “double-shell” que ha sido utilizado en la caracterización de los tejidos vegetales (Inaba *et al.*, 1995 y Harker y Forbes, 1997).

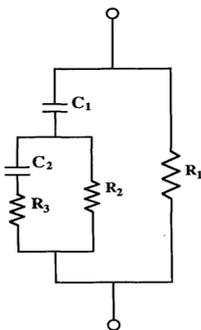


Figura 2-20. Modelo eléctrico usado para tejidos biológicos. Capacitancia de la membrana (C_1), capacitancia de otras membranas (C_2), resistencia extracelular (R_1), resistencia del citoplasma (R_2) y resistencia de organelos (R_3). (Inaba *et al.*, 1995).

En este modelo C_1 y C_2 representan la capacitancia de la membrana plasmática y otras membranas incluyendo el tonoplasto, respectivamente. R_1 , R_2 y R_3

corresponden a las resistencias del espacio intracelular, citoplasma y organelos internos (principalmente vacuolas), respectivamente (Inaba *et al.*, 1995).

Uno de los circuitos equivalentes más simples, el cual se utiliza también en el estudio de los tejidos biológicos, está formado por una resistencia (R_p) unida a un Capacitor (C) en paralelo y estos a su vez a una resistencia en serie R_s , que en general refleja la resistencia eléctrica de la interfase muestra – electrodo. (Cabrera *et al.*, 2007).

Además de estos componentes (resistencias y capacitancias) el elemento de fase constante (CPE, por sus siglas en inglés) es un elemento que surgió como respuesta a la desviación respecto del comportamiento capacitivo ideal de los sistemas reales (Barrera *et al.*, 2006). Los CPE se comportan como resistencias para valores de $n = 0$, como una “impedancia Warburg”, la cual está asociada a los procesos de difusión de acuerdo a la primera ley de Fick, cuando $n = 0,5$ y como capacitancias ideales para $n = 1$ (Morales *et al.*, 2010), lo que significa una acumulación de cargas en el sistema. La Tabla 2-3 muestra las expresiones matemáticas de algunos elementos equivalentes utilizados en los circuitos eléctricos. El CPE está relacionado con la representación de la dispersión en un modelo eléctrico y está dado por la ecuación:

$$Q = \frac{1}{Y (i\omega)^\alpha} , \quad (13)$$

Donde: $i = \sqrt{-1}$, α coeficiente de dispersión ($0 < \alpha < 1$), Q es el elemento de fase constante, $Y = 1/z =$ admitancia.

Tabla 2-3.
 Elementos usados en circuitos de impedancia electroquímica. Morales *et al*, 2010.

Elemento equivalente	Símbolo	Función de transferencia
Resistor (R)		R
Capacitor (C)		$1/i\omega C$
Inductor (L)		$i\omega L$
Elemento de fase constante (CPE)		$1/Y(i\omega)^n$
Warburg semi infinito (W)		$1/Y(i\omega)^{1/2}$
Warburg finito		$1/Y(i\omega)^{1/2} \text{Tanh}\{B(i\omega)^{1/2}\}$

En resumen, fisiológicamente las resistencias de estos modelos se refieren a las resistencias de la membrana celular y a los medios intra y extracelular dentro del tejido; y las capacitancias a las capacitancias de las membranas de numerosas células del tejido.

Como se observó en la Figura 2-15, esta muestra el diagrama de un circuito simple que consta de un circuito paralelo RQ conectado en serie con R_E . Este circuito ha permitido simular datos experimentales de algunas interfaces metal – muestra. Morales *et al*. (2010) mencionaron que a partir de este circuito se estiman los valores experimentales de la impedancia Z' (parte real) y Z'' (imaginaria negativa). Asimismo, a partir de los valores R_E , R y n se pueden obtener los diagramas de Bode (magnitud de la impedancia Z^* contra frecuencia angular ω , y ángulo de fase teta, θ

contra frecuencia ω) o de Nyquist (plano complejo de la impedancia o parte imaginaria negativa Z'' contra la parte real Z' de la impedancia compleja Z^*).

La medición de la impedancia eléctrica tiene la ventaja de que es una técnica sencilla y no destructiva que, como se ha venido mencionado, proporciona información sobre los cambios fisiológicos dentro y fuera de las células y en las membranas de los tejidos biológicos. Algunos trabajos de investigación han enfocado sus esfuerzos para relacionar la calidad de algunos frutos con sus propiedades eléctricas fundamentalmente en el estudio de la impedancia eléctrica de dichos tejidos biológicos.

La medición de las propiedades eléctricas de los tejidos es complicada debido a que existen diversos factores que pueden influir durante su estudio como son heterogeneidad, anisotropía, estado fisiológico del tejido y la polarización del electrodo.

La anisotropía, como se mencionó, es un factor importante al realizar mediciones de impedancia ya que la orientación de los tejidos o células con respecto a la orientación de los electrodos puede influir en los resultados. En tejidos fibrosos la conductividad longitudinal es significativamente mayor que la transversal, incluso cuando las diferencias de trayectoria en el transporte de las cargas son consideradas. Esta diferencia se observa especialmente en el rango de bajas frecuencias.

Rehman *et al.*, (2011) mencionaron una serie de factores ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) que pueden afectar la medición de la impedancia en frutos. X_1 es atribuido a la condición del fruto el cual está en función del tiempo, por ejemplo: inmaduro,

maduro o sobre maduro. X_2 es un factor relacionado a la forma del fruto. Si el fruto es simétrico la impedancia puede permanecer aproximadamente constante cuando se mide a través del diámetro ecuatorial en muestra con un mismo diámetro. En el caso de frutos asimétricos la impedancia puede tener diferentes valores. X_3 es un factor que puede depender del tamaño y peso del fruto. Del tamaño del fruto depende la distancia entre electrodos. Puede evaluarse midiendo la impedancia de frutos de diferentes pesos para desarrollar una relación entre capacitancia/resistencia versus masa. X_4 este factor está relacionado con el área de contacto de los electrodos. Para una pequeña área de contacto los valores de la impedancia deben ser grandes mientras que para áreas grandes la impedancia tiene valores pequeños. Para un área constante no debe haber variaciones en la impedancia. X_5 está relacionado con la temperatura de la muestra. X_6 es un factor que cambia la impedancia de un fruto a una temperatura constante controlada debido a la variación aleatoria de la temperatura alrededor de la temperatura controlada así como a la variación aleatoria de la resistencia de contacto y X_7 es un factor que afecta la impedancia del fruto por un pequeñísimo cambio de la posición del electrodo de su posición original. Por lo tanto la impedancia de un fruto puede ser representada por la siguiente expresión:

$$Z_{ef} = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (14)$$

donde $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ son las variables que afectan el valor de la Z_{ef} de dos maneras: ya sea un efecto sistemático o al azar.

Montoya *et al.* (1994), mencionaron las principales causas de inestabilidad de las mediciones de la impedancia cuando hay contacto directo entre los electrodos y el tejido en estudio y las cuales son:

1. Oxidación del electrodo.

El grado de oxidación, el cual probablemente cambia de acuerdo al estado de madurez y a los cambios en la composición del fruto, contribuye al fenómeno de la conductividad eléctrica.

2. Pardeamiento del tejido.

Este ocurre cuando la polifenol oxidasa y los compuestos fenólicos (fenoles) se combinan con el oxígeno. Los fenoles se oxidan formando pigmentos de color oscuro. La polifenol oxidasa se encuentra en los cloroplastos mientras que los fenoles en las vacuolas. Usualmente, el fruto más maduro presenta una mayor oxidación, lo cual puede afectar las mediciones de la impedancia.

3. El efecto perturbador de la cáscara.

La contribución de la cáscara a la conducción debe eliminarse ya que puede no ser constante durante la maduración y almacenamiento del fruto.

4. Polarización del electrodo.

La impedancia de polarización surge debido al contacto eléctrico entre los electrodos y el material biológico y a la acumulación de carga en los electrodos. Esto puede ser un problema a frecuencias por debajo de los 0,5 kHz.

2.3.3 Propiedades mecánicas. Firmeza

Las propiedades mecánicas son aquellas que tienen que ver con el comportamiento de los materiales cuando se les aplica una fuerza. Algunas propiedades como el comportamiento esfuerzo / deformación unitaria de un material bajo cargas dinámicas y estáticas, así como las características de flujo de un material expuesto en el aire o en el agua, pueden ser clasificadas como propiedades mecánicas (Mohsenin, 1986).

La Reología es la ciencia dedicada al estudio de la deformación y el flujo de la materia. La mecánica es la parte de la física que estudia las fuerzas y el movimiento. Reológicamente, el comportamiento mecánico de un material está expresado en términos de tres parámetros: fuerza, deformación y tiempo. Las propiedades mecánico/reológicas pueden clasificarse en cuantitativas y cualitativas. Algunos ejemplos de las cuantitativas son: deformación unitaria (ϵ), tensión (σ), resistencia, límite elástico, módulo de elasticidad o módulo de Young (E), grado de elasticidad, entre otras. Dentro de las propiedades cualitativas podemos mencionar a la textura, elasticidad, plasticidad y firmeza. Para conocer más a detalle estas propiedades ver Mohsenin (1986) y Barreiro y Ruiz Altisent (1996).

El termino textura, deriva del latín *textura* que significa tejido y es usado para describir la composición, estructura o sustancia de cualquier objeto en lo que respecta a sus componentes o elementos. La organización internacional para la estandarización a través de la norma ISO 5492 define a la textura como el conjunto de los atributos mecánicos, geométricos y de superficie de un producto, perceptibles por medio de receptores mecánicos, táctiles, visuales y audibles (Rosenthal, 1999).

La textura es un atributo de la calidad que incluye algunas propiedades mecánicas de interés comercial, que pueden no ser de interés para el consumidor, como la resistencia al daño mecánico. La importancia de la textura en la aceptabilidad de los productos hortofrutícolas varía ampliamente ya que depende del tipo de alimento y puede ser afectada por el bagaje cultural. Bourne (2002) define tres grupos según su importancia de la textura en su calidad:

1. Crítica. Donde la textura de los alimentos es una característica de calidad dominante; por ejemplo: carne, papas fritas, hojuelas de maíz, apio, etc.
2. Importante. En la cual la textura marca una significativa pero no dominante contribución a la calidad total, contribuyendo junto con el sabor y la apariencia; por ejemplo: la mayoría de frutos y vegetales, quesos, pan, etc.
3. Mínima. La textura no es una característica significativa para la calidad total del alimento; como las bebidas y sopas.

La textura es un parámetro cualitativo complejo y variable de gran importancia en la valoración de la calidad de frutas y hortalizas para su consumo en fresco. El cambio en la textura de los productos hortofrutícolas es una consecuencia de los procesos naturales de la maduración relacionados con las características bioquímicas, fisiológicas y estructurales (Cordenunsi *et al.*, 2003).

Durante la maduración, se llevan a cabo cambios en la pared celular como: solubilización y degradación de la pectina y pérdida de carbohidratos como la galactosa y arabinosa (como se citó en Abbott y Harker, 2004).

Diferentes factores como el contenido de agua, las propiedades físicas de las paredes de las células y la estructura de los tejidos, actúan conjuntamente para determinar la resistencia, firmeza y elasticidad, características que, junto con otras, conforman la textura (Diezma *et al.*, 2001) y que han sido de utilidad para conocer el grado de calidad de las frutas y hortalizas.

La resistencia (o comportamiento mecánico) de los frutos a los daños mecánicos está definida básicamente por las siguientes características: **físico – morfológicas** como volumen, forma y estructura externa (exocarpio) e interna (mesocarpio, endocarpio y embrión) de los frutos, los cuales actúan de diferentes formas ante

las mismas condiciones; **bioquímicas – fisiológicas**, como el grado de madurez que tiene estrecha relación con diversos cambios hormonales y enzimáticos que propician el ablandamiento del fruto y; **anatómicas – histológicas** como tipo de célula, forma, tamaño y dureza, así como el volumen del espacio intercelular y la orientación del crecimiento celular.

La firmeza es un atributo de la textura importante en frutas y vegetales y es utilizada para estimar el grado de madurez de un fruto ya que la maduración inicialmente mejora y ablanda la textura del fruto, lo que asociado a los cambios en el sabor y color, hace que alcance la máxima calidad comestible. La firmeza se usa principalmente como índice de cosecha y es ampliamente utilizada para medir la calidad de los productos hortofrutícolas como la fresa.

Algunos factores biológicos, además de los mencionados, que afectan a la firmeza de los frutos son: el tamaño y forma celular, contenido de agua a nivel celular y organización celular. El arreglo de las células del parénquima dentro del tejido es otro factor que afecta las propiedades mecánicas de las frutas y hortalizas.

El arreglo celular puede ser como columnas o como serie escalonada donde cada célula se superpone sobre la unión de dos células. El tipo de arreglo, así como la orientación celular, son factores que afectan las propiedades mecánicas de estos productos (Abbott y Harker, 2004).

En la Figura 2-21 se muestran dos imágenes microscópicas de la forma, tamaño y arreglo celular de una porción de tejido obtenido a través de dos cortes transversales en la fresa de la variedad 'Sweet charlie' con un nivel seis de "grado de madurez" (véase Figura 4-9). La Figura 2-21 a) muestra las imágenes (40X) de un grupo de

células de la parte carnosa de la fresa (mesocarpio). Como se puede observar, las células presentan diversas formas desde ovoideas y esféricas, de tamaño irregular, percibiéndose de manera general una consistencia rígida (turgencia) con espacios extracelulares bien definidos y un tipo de empaçado semicerrado (contacto entre células y espacios extracelulares visibles). La Figura 2-21 b) corresponde a un corte realizado en la zona del parénquima esponjoso (ver Figura 2-23). La imagen (40X) muestra células alargadas y aplanadas, percibiéndose una consistencia blanda y con un empaçado cerrado ya que los espacios extracelulares están poco definidos. Son claramente visibles las cavidades formadas por este tipo de células.

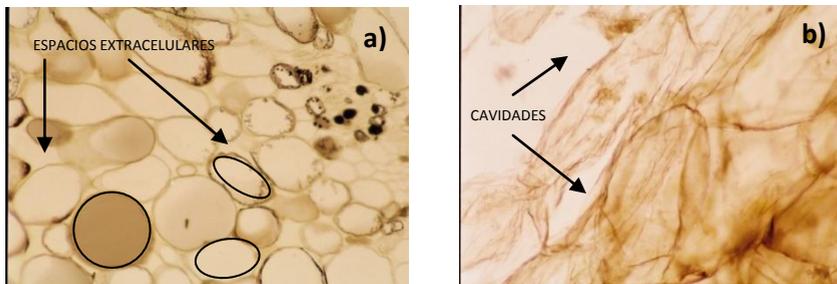


Figura 2-21. Imagen microscópica (40X) de dos cortes en a) región de la parte carnosa de la fresa y b) parénquima esponjoso. Instituto de Neurobiología de la UNAM, 2010

En la Figura 2-22 se muestran las imágenes microscópicas (10X) de dos cortes transversales realizados en dos zonas distintas de fresas de la variedad 'Sweet charlie' con un nivel seis de "grado de madurez" (véase Figura 4-9).

En la Figura 2-22 a) se puede observar que las células de la parte carnosa (mesocarpio) de la fresa, presentan forma y tamaño irregular. En esta imagen los espacios extracelulares están bien definidos. En el caso de la imagen 2-22 b) correspondiente al corte realizado en la zona del parénquima esponjoso, podemos ver células con diferentes tamaños, de forma alargada y muy irregulares.

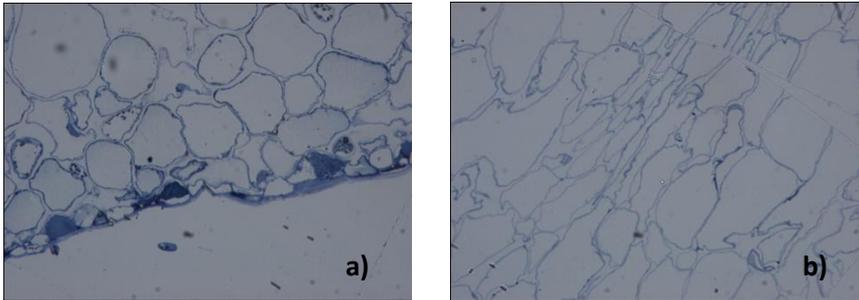


Figura 2-22. Imagen microscópica (10X) de dos cortes a) región de la parte carnosa de la fresa y b) parénquima esponjoso. Instituto de Neurobiología de la UNAM, 2010

En la Figura 2-23 se muestra un corte transversal y sus diferentes zonas del fruto de la fresa.

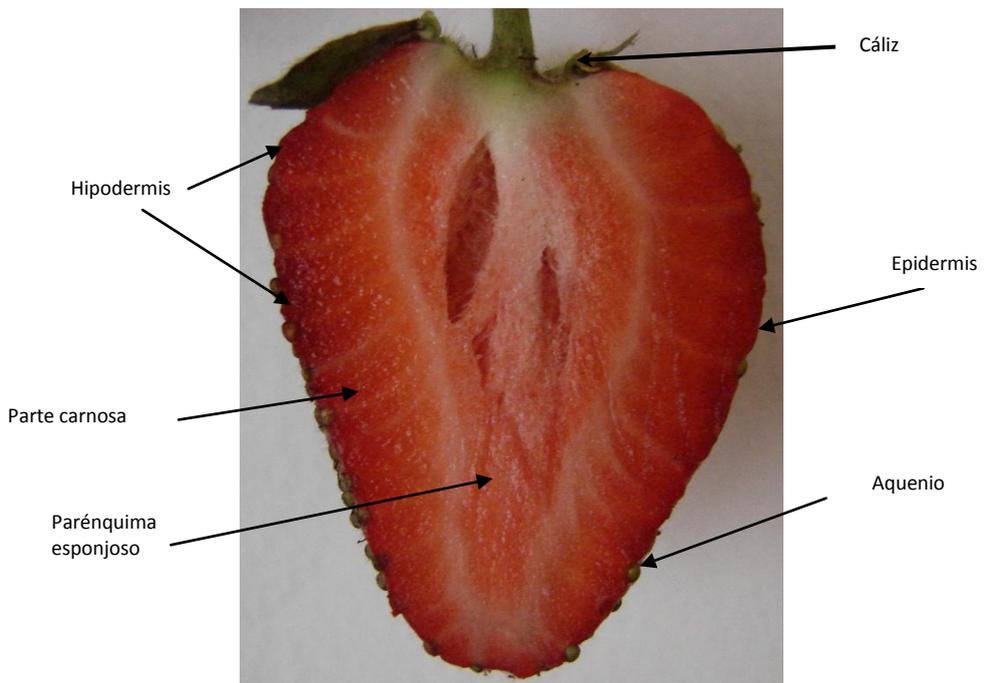


Figura 2-23. Corte transversal de la fresa variedad 'Sweet charlie', "grado de madurez" 6.

La forma y tamaño de las células así como el arreglo y empaquetado de ellas para formar los tejidos son características que cambian dentro de un mismo fruto y que dependiendo de factores externos como tipos de suelo, disponibilidad de agua, exposición al sol y tipo de variedad pueden estar cambiando constantemente. Asimismo, por sí sola, la célula es incapaz de proporcionar soporte mecánico, la unión de células y la interacción entre la rigidez de la pared celular y la presión hidrostática interna (turgencia) son los que proporcionan soporte. Esta presión se genera cuando la concentración de solutos dentro de la célula es mayor que fuera de ella. Esta diferencia de concentraciones provoca que el agua fluya hacia el interior de la célula por medio del proceso de ósmosis. Este flujo es restringido por la fuerza física de la pared celular provocando el fenómeno de turgencia dentro de la célula.

Para caracterizar el comportamiento mecánico de algunas frutas y hortalizas se han desarrollado diversas pruebas (ensayos empíricos) que determinan las interacciones entre esfuerzo, deformación y tiempo, producidos por algún tipo de carga. Una de estas pruebas es la que reproduce la curva esfuerzo – deformación unitaria, que consiste en someter a compresión o tensión el material y registrar al mismo tiempo la fuerza y deformación unitaria. Las principales variables obtenidas de este tipo de prueba son el límite proporcional, el punto de fluencia, el rango plástico, el punto de ruptura y el módulo de Young (Mohsenin, 1986). El módulo de Young se ha sugerido como una medida de la firmeza del fruto.

Bajo cargas mecánicas las frutas y vegetales presentan un comportamiento visco elástico el cual depende tanto de la cantidad como de la velocidad de la carga aplicada (fuerza). Sin embargo, para propósitos prácticos, a menudo se asume que los productos hortofrutícolas son elásticos. La medición de las propiedades

elásticas considera solamente la fuerza y deformación, mientras que la medición visco elástica considera la fuerza, deformación y el tiempo. Por lo tanto, cuando un material sea visco elástico, un parámetro importante a considerar es la velocidad de la carga ya que ésta deberá mantenerse constante durante las pruebas y ser reportada debido a que productos blandos como el jitomate, cereza y los cítricos tiene un componente viscoso que contribuye ampliamente a la percepción de la textura.

La mayoría de las pruebas mecánicas no destructivas miden las propiedades elásticas (Modulo de Young) aplicando deformaciones muy pequeñas. El módulo de elasticidad o de Young nos indica la capacidad de un material a mantener un comportamiento elástico bajo una cierta deformación, su ecuación, que se muestra a continuación, fue desarrollada por Thomas Young (1773 – 1829):

$$E = \text{stress} / \text{strain} = \frac{F/A}{\Delta l/l} = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (15)$$

Donde E es el módulo de Young, F es la fuerza aplicada perpendicularmente al área definida por el stress, A es el área seccional de la muestra, l es la altura de la muestra y Δl el cambio en la altura después de haber aplicado la fuerza F .

En el caso de la fresa, la firmeza es esencial para garantizar su calidad durante su manejo y transporte. Esta cualidad, como se mencionó, está relacionada con las características estructurales, fisiológicas y bioquímicas de las células. Los constantes cambios fisiológicos en las células hacen que la medición de la firmeza en frutas y hortalizas sea difícil. Así mismo, la turgencia celular, el material intracelular, la pared celular y la integridad de la membrana, están relacionados

con la firmeza, por lo que es importante conocer al detalle los cambios fisiológicos poscosecha que ocurren en los frutos. Por otro lado, es importante tomar en cuenta la velocidad de respiración, la velocidad de producción de etileno y la descomposición de las sustancias pecticas, ya que estos pueden contribuir a la pérdida o retención de la firmeza por largos periodos.

Como lo mencionan algunos autores la firmeza de los frutos es un indicador en los cambios de maduración permitiendo predecir la susceptibilidad al daño y siendo de utilidad para controlar la maduración durante el almacenamiento, transporte y venta (Valero *et al.*, 2003).

En el caso de frutos como la fresa, Nunes *et al.* (2006) reportaron que la firmeza de las variedades 'Sweet charlie', 'Oso Grande' y 'Chandler' desciende conforme el fruto va madurando, tanto en el campo como en el almacenamiento. Pelayo-Zaldivar *et al.*, (2005) midieron la firmeza de tres variedades de fresa 'Aromas', 'Diamante' y 'Selva', reportando que el tipo de cultivar tiene una mayor influencia en la firmeza que la fecha de cosecha.

Algunos investigadores han realizado trabajos enfocados a estudiar la posible relación entre la firmeza y el color. Byrne *et al.*, (1991) midieron la firmeza y el color en melocotones reportando una buena correlación entre la firmeza y la variable de color a^* , cuyos valores aumentan conforme va disminuyendo la firmeza. Yommi *et al.*, (2012) estudiaron los cambios de color en la piel de las cerezas y su relación con algunos índices de calidad. En este trabajo obtuvieron un coeficiente de correlación de 0,84 para la variedad 'lapins', entre la firmeza y la variable de color b^* .

Muchos trabajos se han dedicado al desarrollo de técnicas destructivas y no destructivas para medir la calidad de los productos hortofrutícolas en base a diferentes índices de calidad, como la firmeza y el grado de madurez. A continuación se describen algunas de ellas.

2.4 Equipos para medir la calidad de frutas y hortalizas

2.4.1 Técnicas destructivas

Comúnmente la medición de la firmeza de frutos pequeños como fresas, cerezas y arándanos se realiza aplicando una ligera presión con los dedos de la mano. Esta medición subjetiva, es una medida del grado de deformación del fruto bajo la aplicación de una fuerza de compresión (Timm *et al.*, 1996). La firmeza, como se ha comentado, puede estimarse a través de distintas magnitudes como la resistencia a la ruptura, el módulo de elasticidad, la indeformabilidad o cualquier otra magnitud proporcional a éstas (Valero, 2001).

Barreiro y Ruiz-Altisent (2001) mencionaron algunas características que deben tener los instrumentos y equipos utilizados para medir la calidad de las frutas y hortalizas y de las cuales podemos destacar las siguientes: objetividad, facilidad de uso, sensibilidad y precisión, reproducibilidad, portabilidad, rapidez, que sean no destructivos y de bajo costo. La asignación de prioridades a estos aspectos es función de las características específicas del usuario.

Cualquier método para estimar la firmeza debe proporcionar una medida exacta y relevante de cada fruto, así mismo debe ser de fácil manejo y generar valores consistentes y por lo tanto debe ser capaz de detectar las variaciones de la firmeza en los frutos (Hopkirk *et al.*, 1996).

Uno de los métodos destructivos y cuasi estáticos más utilizados para medir la firmeza de los frutos es el desarrollado en 1925 por John Robert Magness y George Frederick Taylor. Para llevar a cabo la medición se utilizan probetas cilíndricas de 8 y 10 mm de diámetro junto a un calibrador tipo muelle el cual esta graduado en libras o kilogramos. La probeta es introducida en el fruto después de retirar la piel, a una distancia de 10 mm de profundidad y la lectura de la fuerza de penetración se toma de la escala.

Numerosos trabajos de investigación han hecho uso de este método para medir la firmeza de frutos como la manzana (Pitts *et al.*, 1997; Bramlage, 1983; Ubierna y Ruiz-Altisent, 2000; Lammertyn *et al.*, 1998; Abbott *et al.*, 1992), albaricoque (Torregrosa *et al.*, 2003), cerezas (Lu, 2001), melocotones (Nelson *et al.* 1995; Ubierna y Ruiz-Altisent, 2000), peras (Hernández *et al.*, 2004) y fresas (Burkhart, 1943; Nunes *et al.*, 2006).

Del método Magness-Taylor se han derivado instrumentos como el penetrómetro marca Effegi ("*Effegi hand-held firmness tester*") que es ligero y fácil de transportar y es utilizado para estimar la firmeza, realizando de dos a tres lecturas alrededor del eje ecuatorial de frutos como manzanas (Watkins *et al.*, 1995; DeLong *et al.*, 2000; McGlone *et al.*, 2002), peras (Calvo *et al.*, 2003) y kiwis (Cooper *et al.*, 2005).

En México, la norma NMX-FF-014-1982, establece el método para determinar la resistencia a la penetración de la fruta en estado fresco. Este método se basa en la medición del esfuerzo necesario para vencer la resistencia que presenta la pulpa a la introducción de una probeta cilíndrica de metal. Para esto se usa un penetrómetro modelo F.T.327 marca Effegi (Figura 2-24) con probetas de 8 y 10

mm de diámetro, con fuerzas de presión que van desde 9 hasta 178 N, aproximadamente.



Figura 2-24. Penetrómetro modelo F.T.327, marca Effegi. Spectrum International.

Aunque es un instrumento ampliamente usado por su fácil manejo en el campo para estimar el estado de madurez de algunos frutos, sus lecturas pueden variar ampliamente entre un mismo usuario o diferentes.

Bramlage (1983), encontró que entre usuarios profesionales del instrumento Magness-Taylor las mediciones pueden variar de 13 a 17 N, aproximadamente, en las lecturas que ellos obtenían de un mismo lote. Además, es un instrumento que debe calibrarse continuamente. Con el propósito de eliminar la variabilidad del operador, algunos equipos o probetas se pueden colocar sobre analizadores de textura computarizados los cuales permiten no sólo la medición de la máxima fuerza sino también el análisis del perfil de textura.

Otros penetrómetros que son usados para medir la firmeza de frutas y vegetales son de las marcas McCormick Fruit Tech (Espinoza, 2003) y Lake City Technical Products (Watkins *et al.*, 1999).

A continuación se mencionan algunos puntos a considerar cuando se realizan mediciones de firmeza de productos hortofrutícolas (Mitcham *et al.*, 1996).

1. Seleccionar el tamaño de la muestra.
2. Seleccionar una muestra al azar representativa del producto incluyendo por los menos de 15 a 25 frutos o el 3% de la muestra total.
3. Seleccionar producto con tamaño uniforme para evitar variaciones en los valores de la firmeza debido a esa variable (el fruto grande es generalmente más blando que el pequeño).
4. Asegurar que toda la muestra a analizar se encuentre a la misma temperatura, puesto que frutos con temperatura alta son generalmente más blandos que frutos con temperaturas bajas.
5. Manejo correcto de los equipos para medir la firmeza.
6. Realizar dos mediciones por muestra (excepto cuando son frutos pequeños), al mismo tiempo sobre lados opuestos, en la zona ecuatorial, evitar zonas expuestas al sol.
7. Remover, cuando se requiera, una sección de la piel del fruto (más grande que el diámetro de la probeta) con un cuchillo o navaja.
8. Usar la probeta adecuada para la prueba (Tabla 2-4) dependiendo del tipo y tamaño de la muestra (véase sección 4.4.4).
9. Todas las mediciones deben ser realizadas por un mismo operador para minimizar variabilidades.
10. Mantener la muestra sobre una superficie sólida e inmóvil y una velocidad uniforme de la probeta.
11. La profundidad de penetración deberá ser consistente a la marca indicada en la probeta.

12. Estandarizar las condiciones de la prueba como temperatura, humedad relativa, estado de madurez, tamaño del fruto y contenido de humedad (Moore y Sistrunk, 1980).

Tabla 2-4.
Tamaños de probeta recomendados para medir la firmeza en frutos. Mitcham *et al*, 1996.

Tamaño de la probeta	Tipo de muestra
11 mm (7/16")	Manzana, melocotón, pera
8 mm (5/16")	Chabacano, aguacate, kiwi, mango, nectarina, papaya, melocotón y manzana
3 mm (1/8")	Cereza, uva y fresa
1,5 mm (1/16")	Aceituna, kiwi, melón, jitomate

El método de punción se refiere generalmente a la fuerza requerida para penetrar con una aguja un fruto o vegetal a una distancia de profundidad determinada, la cual generalmente se mantiene constante. La máxima fuerza registrada durante la penetración está relacionada con la resistencia de la piel y con la turgencia de las células de las capas inmediatamente inferiores. Kuczyński (1985), reportó una buena correlación entre esta técnica y el estado de madurez de cuatro variedades de fresa. Ubierna y Ruiz-Altisent (2000) realizaron mediciones en kiwi, melón y tomates usando una aguja de 0,8 mm de diámetro y base plana, hasta una profundidad de penetración de 8 mm.

El prototipo "*Massey Twist Tester*", Figura 2-25, es un instrumento desarrollado por la Universidad de Massey en Palmerston Norte, Nueva Zelanda y mide la fuerza requerida para hacer girar una pequeña hoja rectangular dentro de la pulpa de la fruta a una distancia fija de 3 mm debajo de la piel. Las mediciones se hacen por duplicado en puntos opuestos y la fuerza de trituración ("crush strength") es medida y registrada (véase Anexo 3).

Los resultados obtenidos con este instrumento al trabajar con manzanas, peras (Crouch y Griessel, 1998), patatas y kiwi (Studman, 1995), han mostrado una buena correlación con los parámetros de madurez existentes como: °brix de sólidos solubles, materia seca, contenido de almidón, color de la piel, entre otros.

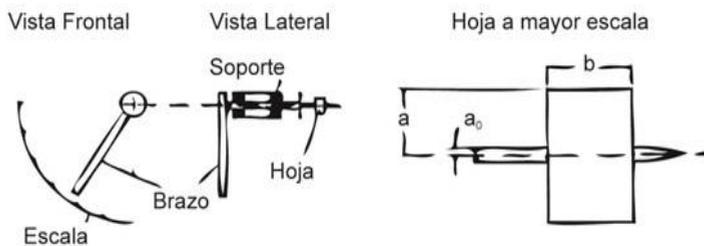


Figura 2-25. Principio de operación del Massey Twist Tester. Studman, 1995.

Como se menciona, las probetas usadas para las pruebas de penetración y punción pueden adaptarse a equipos que eliminan el factor humano dentro de estos podemos mencionar la máquina universal de pruebas (Figura 2-26), la cual comúnmente es usada para medir, de manera destructiva y no destructiva, las propiedades físicas de los productos hortofrutícolas. Estos equipos usan una computadora para controlar y registrar los datos, así como permitir el desarrollo de ciclos de carga sofisticados. Las mediciones se pueden realizar en frutos y vegetales enteros o muestras de tejidos. Los valores teóricos son obtenidos desde los datos de fuerza-deformación.

Por ejemplo, Mehinagic *et al.*, (2004) llevaron a cabo pruebas de penetración y compresión de cuatro variedades de manzana, utilizando una máquina universal de pruebas. De la prueba de penetración obtuvieron las curvas de fuerza / deformación unitaria y de las de compresión las curvas de fuerza / tiempo. A partir de esta información se pueden estudiar parámetros como: fuerza de ruptura y dureza.



Figura 2-26. Máquina Universal de Pruebas (UTM, por sus siglas en inglés). Departamento de Maquinaria Agrícola y Procesos de la Universidad Católica de Leuven, Bélgica.

Otro equipo utilizado para la medición de la calidad de los alimentos es el Analizador de Textura TA-XT2 comúnmente llamado texturómetro (Figura 2-27), el cual es un equipo específicamente diseñado para alimentos, tiene controles electrónicos muy precisos, una elevada sensibilidad y gran versatilidad. Este equipo es ampliamente usado para cuantificar y correlacionar las mediciones de textura sensorial con mediciones físicas. Debido a la versatilidad del instrumento es posible realizar una gran cantidad de pruebas haciendo uso de diferentes accesorios y obtener una gran variedad de parámetros físicos como: dureza, fuerza de corte / ruptura, adhesividad, elasticidad, masticabilidad, entre otros.



Figura 2-27. Texturómetro TA-XT2 marca Stable Micro Systems. Departamento de Ciencias de la Vida Campus Irapuato – Salamanca, Universidad de Guanajuato.

Cordenunsi *et al.* (2003) llevaron a cabo un análisis de la textura de diferentes variedades de fresa, usando este tipo de texturómetro, con el objetivo de conocer la relación de la textura con la composición química y su valor nutricional durante una semana de almacenamiento a 6 °C. Restrepo y Aristizabal (2010) midieron la firmeza de la fresa (cv. 'Camarosa'), utilizando el analizador de textura TA.TX2, con el objetivo de evaluar dos tipos de recubrimientos comestibles. Ellos utilizaron una sonda metálica de 5 mm de diámetro, cuya velocidad de penetración fue de 5 mm/s y una deformación de 10 mm. Las mediciones se realizaron sobre una de las caras, en la zona media de cada fruto.

El texturómetro TA.TX2 también ha sido utilizado para determinar las propiedades mecánicas de frutos como: fresa (Hernández *et al.*, 2008; Civello *et al.*, 1999), tuna (González-Araiza, 1998), jitomates (Wu *et al.*, 2001), y mango (Valente *et al.*, 2003).

Para la medida de la firmeza de productos hortofrutícolas se emplean también diferentes modelos de dinamómetros digitales. El PENECEL DFT 14 (Figura 2-28) diseñado por la empresa francesa "Giraud Technologie" mide la firmeza de frutos como manzanas, peras, duraznos y pepinillos. Es un dinamómetro electrónico el cual mide la fuerza máxima obtenida al momento de penetrar una probeta.



Figura 2-28. Equipo PENECEL DFT 14 para medir la firmeza de manera no destructiva. www.infoagro.com.

2.4.2 Técnicas no - destructivas

Las técnicas no destructivas para medir la calidad de los frutos o vegetales permiten que una misma muestra sea monitoreada varias ocasiones en un determinado periodo de tiempo, siendo muy útil cuando existe una gran diferencia entre frutos o vegetales individuales o donde hay un limitado número de muestras.

La aplicación exitosa de estas técnicas requiere de la combinación de sensores con modelos matemáticos sofisticados y algoritmos computacionales para establecer las relaciones entre las propiedades fisicoquímicas, mecánicas, eléctricas, ópticas, entre otras, y los atributos de calidad de los productos. En los últimos 10 años han sido desarrolladas nuevas tecnologías basadas en las propiedades electromagnéticas, las cuales incluyen los rayos X, resonancia magnética nuclear (NMR, por sus siglas en inglés), fluorescencia y con menos éxito hasta el momento la impedancia eléctrica y permitividad así como la detección térmica y selectiva de volátiles (Ruiz - Altisent *et al.*, 2010).

A continuación se describen varias técnicas no destructivas utilizadas para evaluar la calidad de los frutos las cuales se basan en las propiedades mecánicas, acústicas electromagnéticas y eléctricas de los frutos.

2.4.2.1 Basadas en medidas de fuerza – deformación

Para caracterizar el comportamiento mecánico de los frutos se utilizan las pruebas de fuerza – deformación unitaria, las cuales consisten en someter a penetración o tensión el material y registrar al mismo tiempo la fuerza de penetración o

deformación y la deformación ocasionada. Las principales variables obtenidas de este tipo de pruebas son el límite proporcional, el punto o límite de fluencia, el rango plástico, el punto de ruptura y el módulo de deformabilidad. En la figura 2-29 se muestra una grafica típica obtenida durante este tipo de pruebas.

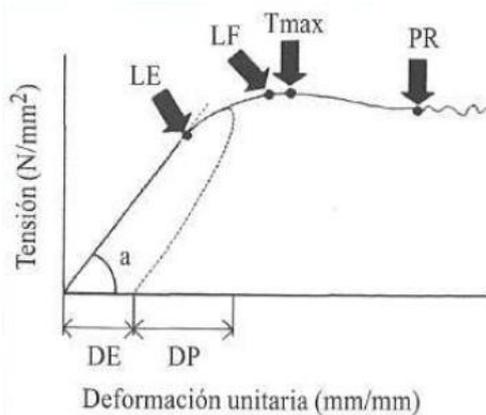


Figura 2-29. Curva tensión – deformación unitaria. LE, límite elástico. LF, límite de fluencia. PR, punto de ruptura. DE y DP, deformaciones elástica y plástica y $\text{tg}(a)$ es el modulo de elasticidad. Barreiro y Ruiz-Altisent, 1996.

Hopkirk *et al.* (1996) compararon la utilidad de cuatro prototipos para medir la firmeza del fruto del kiwi. Uno de estos prototipos llamado KIWIPOKE mide de manera no destructiva la firmeza y genera lecturas similares a las del penetrómetro. Hopkirk *et al.*, reportaron que los valores obtenidos con este prototipo disminuyen conforme el fruto madura. Sin embargo, tiene la desventaja de que no detecta cambios en periodos cortos de almacenamiento.

Chiabrando *et al.*, (2008) utilizaron el equipo DUROFEL² (véase Anexo 3) para medir de manera no destructiva la firmeza y la calidad de duraznos, chabacanos, jitomates, ciruelas y fresa, mientras que Lefever *et al.*, (2004) de uvas y cerezas. Este equipo mide la deformación superficial bajo una presión similar a la que

² <http://durofel.com/>

ejercen los dedos al tocar el fruto suavemente. Sólo puede usarse en productos de textura flexible.

Ochmian y Grajkowski (2008) utilizaron el equipo “*the BioWorks FirmTech II*” para medir de manera no destructiva la firmeza de dos variedades de fresa con el propósito de conocer el efecto en la calidad de los frutos del almacenamiento refrigerado (2 °C, 75 % HR) y en condiciones normales (20 °C, 95 % HR). La firmeza de las fresas, en ambas condiciones, muestra un aumento después de una hora de almacenamiento para posteriormente comenzar a disminuir en el resto de las siguientes horas.

Tetteh *et al.*, (2004), midieron la pérdida de la firmeza del arándano utilizando el “*FirmTech II*”, con el objetivo de determinar el efecto en la calidad debido al retraso en su refrigeración para tiempos de 0, 2, 4, 8, 12 y 24 h antes de ser almacenados a 4 °C. El modelo desarrollado en este trabajo fue adecuado para evaluar los beneficios de disminuir la temperatura para diferentes tiempos de retraso en la refrigeración o el beneficio de reducir el retraso en la refrigeración a temperaturas específicas.

Con este tipo de instrumento se pueden llevar a cabo pruebas de compresión (máxima fuerza), punción, relajación y medición del tamaño. Éste tiene la ventaja de medir los cambios de firmeza ocurridos en periodos cortos durante el proceso de maduración (véase Anexo 3).

Las ecuaciones indicadas en los estándares de la ASAE S368.3 para las pruebas de compresión de alimentos de forma convexa fueron adaptadas por Prussia *et al.*, (2006) para calcular el módulo de elasticidad aparente (E_a), utilizando las técnicas

para contacto de dos platos paralelos o un solo plato (Figura 2-30), usando el "FirmTech II" y la máquina universal de pruebas.

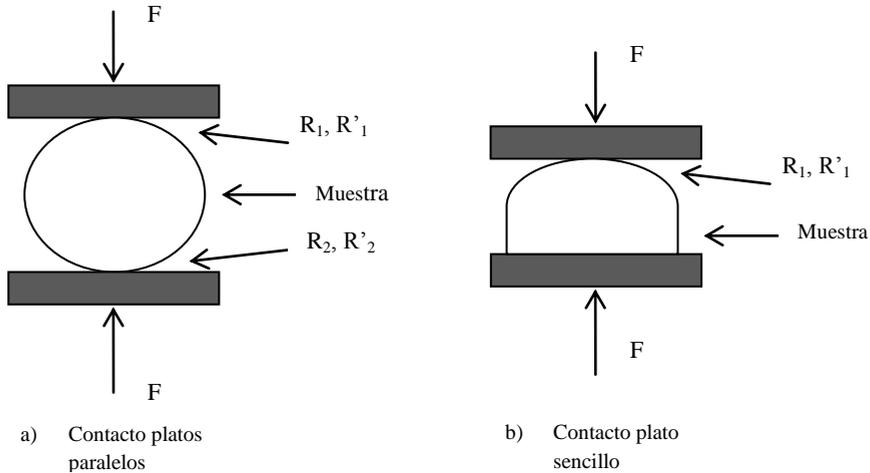


Figura 2-30. Módulo de elasticidad aparente calculado con datos de fuerza y deformación para diferentes geometrías de carga. ASAE S368.3.

El módulo de elasticidad aparente, de los dos tipos de compresión que se muestran en las Figuras 2-30 a) y b), puede ser calculado a partir de las ecuaciones 16 y 17, respectivamente. Estas ecuaciones están basadas en las ecuaciones de Hertz para tensiones de contacto usadas en mecánica de sólidos. Estas asumen que las deformaciones son muy pequeñas y el material en compresión es elástico. Sin embargo, son muy útiles para realizar comparaciones del comportamiento durante la deformación de materiales viscoelásticos cuando hay deformaciones y velocidades de carga similares para todas las muestras en estudio.

$$Ea = \frac{0,388 F(1-\mu^2)}{D^{3/2}} \left[K_u \left(\frac{1}{R_u} + \frac{1}{R'_u} \right)^{1/3} + K_L \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R'_L} \right)^{1/3} \right]^{3/2}, \quad (16)$$

$$Ea = \frac{0,388 K^{3/2} F (1-\mu^2)}{D^{3/2}} \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R'_1} \right]^{1/2}, \quad (17)$$

En las anteriores ecuaciones Ea , es el módulo de elasticidad aparente, Pa, (psi); D , deformación, m (in.); μ , coeficiente de Poisson; F , fuerza N (lbf); R_u, R'_u radio de curvatura en el punto de contacto para la superficie convexa superior m (in), R_L, R'_L radio de curvatura en el punto de contacto para la superficie convexa inferior m (in), R_1, R'_1 radio de curvatura del cuerpo convexo en el punto de contacto m (in). Las constantes K_u y K_L son determinadas usando los datos que se muestra en la siguiente Tabla.

Tabla 2-5.

Valores de m , n y K (adimensionales) para varios valores de θ , ASAE S368.3 Pruebas de compresión de alimentos de forma convexa, 1995

θ	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$\cos \theta$	0.6428	0.5736	0.5	0.4226	0.342	0.2588	0.1736	0.0872	0.0
m	1.754	1.611	1.486	1.378	1.284	1.202	1.128	1.061	1.0
n	0.641	0.678	0.717	0.759	0.802	0.846	0.893	0.944	1.0
K	1.198	1.235	1.267	1.293	1.314	1.331	1.342	1.349	1.351

Timm *et al.* (1996) desarrollaron el “*Portable Instrument for Measuring Firmness*” para medir la firmeza de frutos pequeños como cerezas, arándanos y fresas, el cual es relativamente rápido, objetivo y no destructivo. La firmeza es medida a través de una mínima compresión a la muestra. Este prototipo es capaz de distinguir tanto los diferentes niveles de madurez del fruto como los diferentes grados de daños mecánicos (véase Anexo 3).

2.4.2.2 Basadas en medidas fuerza – deformación – tiempo

Davie *et al.*, (1996) midieron la blandura (“*softness*”) del kiwi, cuantificándola como “coeficiente de blandura”, el cual es estimado como la pendiente de la regresión lineal de la deformación sobre el logaritmo natural del tiempo. Ellos encontraron un incremento lineal del coeficiente con relación al tiempo (véase Anexo 3).

Por otro lado y con el mismo objetivo de medir las propiedades mecánicas de manera no destructiva se han desarrollado dispositivos para el estudio del **impacto** mecánico, el cual está relacionado con el estado de firmeza de algunos frutos y consiste en golpear ligeramente la fruta con un dispositivo dotado de un acelerómetro. Existen dos métodos para medir la fuerza y la aceleración (Diezma *et al.*, 2001):

1. Sistemas que usan un transductor de fuerza (como objeto impactado o como objeto impactante) para medir la fuerza durante el impacto y otro dispositivo generalmente electro-óptico, para medir la deformación.
2. Sistemas en los que un cuerpo de masa conocida golpea la fruta en un punto definido. Un acelerómetro montado en el objeto impactante mide la aceleración negativa durante el tiempo del impacto, la fuerza aplicada en cada instante puede obtenerse como el producto de la masa por la aceleración.

Numerosos trabajos de investigación se han llevado a cabo para medir la firmeza usando las técnicas de impacto. Diversas técnicas para llevar a cabo la aplicación de fuerzas de impacto en frutos y detectar las señales de aceleración han sido

desarrolladas como predictores de la firmeza en el tiempo y frecuencias dominantes.

Los parámetros empíricos de impacto, usados frecuentemente, para medir la firmeza son C_1 y C_2 :

$$C_1 = \left(\frac{P_{m\acute{a}x}}{T} \right) , \quad (18)$$

$$C_2 = \left(\frac{P_{m\acute{a}x}}{T^2} \right) , \quad (19)$$

Donde $P_{m\acute{a}x}$ es la amplitud del pico para el pulso de impacto y T , es una característica del tiempo de impacto, como: T_p tiempo en la amplitud del pico, T_c duración del pulso o T_m ancho del impacto a la mitad de la amplitud del pico. Estos parámetros de impacto y los valores característicos adicionales de la señal de impacto en el tiempo y frecuencia dominante han sido utilizados para evaluar la firmeza de varios frutos como las manzanas (Shmulevich *et al.*, 2003), peras y duraznos.

Chen *et al.*, (1996) determinaron teóricamente y experimentalmente el efecto de la masa de impacto sobre la detección de la firmeza de peras utilizando un impactador de caída libre (vertical). Utilizando las ecuaciones mostradas en el Anexo 3, así como impactadores de diferentes valores de masa, determinaron los valores de la fuerza máxima tanto de frutos con textura blanda como firme. Según los resultados teóricos, la masa de impacto tiene un mayor efecto sobre el índice de firmeza A/t . Los valores de este índice tanto para frutos con textura blanda y firme, incrementan más de tres veces cuando la masa de impacto es reducida de 50

a 10 g. En relación a los resultados experimentales, estos mostraron una buena correlación entre la aceleración máxima y el módulo de elasticidad y la relación entre el índice de firmeza (A/t) y el módulo de elasticidad. En general, los valores obtenidos con el impactador de 10 g son aproximadamente tres veces más grandes que los obtenidos con el de 50 g.

Ortiz (1999) en su tesis doctoral utilizó el impactador de caída libre para medir variables como *fuerza máxima de impacto*, *deformación máxima* y *deformación permanente* en melocotones concluyendo que las variables de impacto, fuerza máxima y deformación máxima, presentan una correlación con algunos parámetros instrumentales destructivos obtenidos mediante ensayos con una Máquina Universal de Ensayos Mecánicos. En este mismo sentido y con el objetivo de clasificar melocotones en dos categorías de acuerdo a su textura, Ortiz *et al.*, (2001) utilizaron esta misma técnica con el propósito de detectar, junto con otras técnicas, melocotones lanosos.

Hopkirk *et al.* (1996) utilizaron un prototipo llamado "*SoftSense*", el cual es un sistema basado en la respuesta al impacto para medir la firmeza del kiwi. Ellos encontrando una buena correlación con los valores obtenidos con el penetrómetro "*Effegi*", ya que conforme disminuye el "*dwell time*" disminuye la firmeza (véase Anexo 3).

Algunos equipos han sido desarrollados para medir la calidad de las frutas en línea de proceso, con velocidades que pueden alcanzar las 700 mediciones por minuto. Uno de estos equipos es el "*Sinclair Internal Quality Firmness tester*" (SIQ-FT, por sus siglas en inglés)³. El equipo mide la respuesta eléctrica por medio de un sensor

³ http://www.sinclair-intl.com/pages/iQ_pages/iq_online.html

el cual hace cuatro mediciones por muestra en diferentes partes del fruto. Se busca medir para cada fruto sus propiedades elásticas, las cuales están relacionadas con el estado de madurez del fruto (véase Anexo 3).

Shmulevich *et al.*, (2003) utilizaron, para medir la firmeza de la manzana, dos técnicas no destructivas una de impacto de baja masa (SIQ-FT) y otra de respuesta acústica (Índice de firmeza acústica - FirmalonTM). Los resultados obtenidos fueron comparados con los de técnicas destructivas de penetración (MT) y de compresión (E'). Ellos encontraron un coeficiente de correlación alto ($R = 0,913$) entre los valores del módulo de elasticidad (E') y los valores acústicos. Similares resultados se obtuvieron entre el E' y el SIQ-FT. Los cambios significativos en los parámetros de la firmeza según el ablandamiento del fruto, son importantes para una clasificación eficiente. El cambio más grande en la firmeza fue el que presentó el índice de firmeza acústico con un decremento promedio de 3,43 en un lapso de 21 días. El E' decreció en un 2,75, el SIQ-FT en un 1,78 y el MT en un 1,41.

Valero *et al.* (2003) reportaron los resultados de la medición de la firmeza de peras, duraznos y ciruelas, con el SIQ-FT versión portátil (no destructivo) y su relación con datos obtenidos usando un penetrómetro (destructivo). La correlación entre los resultados obtenidos es alta en todos los casos, con valores de R desde 0,70 hasta 0,93. Ellos encontraron un alto potencial para la aplicación de este equipo en el control de calidad en los frutos mencionados.

2.4.2.3 Respuesta acústica

Otras técnicas no destructivas son las que se basan en la respuesta acústica al impacto o a las vibraciones forzadas, las cuales tienen una correlación con las

características internas de frutas y vegetales. Las mediciones acústicas abarcan las frecuencias audibles entre 20 Hz y 15 kHz, aproximadamente.

La velocidad de propagación de las ondas acústicas las cuales son bajas en los tejidos biológicos variando desde 200 hasta 700 m/s, la atenuación de las ondas al atravesar estos medios vegetales que varía entre 1 y 7 dB/mm en función del tipo de tejido y reflexión, son parámetros importantes para evaluar las propiedades acústicas de los tejidos de productos hortofrutícolas.

Algunos investigadores han desarrollado modelos teóricos para describir el comportamiento dinámico de estos materiales biológicos. Estos modelos asumen que la muestra es esférica y elástica (Ruiz-Altisent *et al.*, 2010).

Cooke y Rand (1973) propusieron un modelo matemático para la interpretación del comportamiento vibracional de frutos intactos. Mostraron que el módulo elástico o Módulo de Young puede ser estimado satisfactoriamente como se muestra en la siguiente ecuación:

$$E = C \cdot f^2 \cdot m^{2/3} \cdot \rho^{1/3} , \quad (20)$$

donde E, es el coeficiente de elasticidad (Pa); C, es una constante; f, es la frecuencia de mayor amplitud (Hz); m, es la masa en kg; y ρ , es la densidad en kg/m³. Como se ha mencionado, para los frutos el módulo de elasticidad cambia conforme aumenta la madurez. Esta técnica se ha usado de manera exitosa en productos como melón, manzana, durazno y jitomate.

Algunos equipos se basan en la medida del sonido emitido por las vibraciones de un fruto en respuesta a un ligero golpe con una pequeña varilla o vástago. La señal puede ser capturada por un micrófono, sensores piezoeléctricos o vibrometros láser. La señal acústica es capturada y las frecuencias (primera, segunda o tercera frecuencia natural según la fruta ensayada) de vibración son determinadas por medio de la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés). El valor de cada frecuencia resonante es dependiente de la geometría, densidad y las propiedades elásticas de la muestra (Diezma y Ruiz-Altisent, 2004).

Nourain *et al.*, (2005) registraron las vibraciones de melones, utilizando un acelerómetro. A través de la técnica del elemento finito estimaron la localización de la excitación óptima y analizaron los modelos vibracionales. El análisis del elemento finito es una técnica de simulación que permite conocer, a través de modelos numéricos, el comportamiento de un cuerpo cuando es sometido a cargas (fuerza o presión) o temperaturas. La respuesta acústica de cada melón fue obtenida golpeando el fruto en la zona ecuatorial con una esfera de madera, las vibraciones generadas fueron detectadas en el lado opuesto al impacto por el acelerómetro. La vibración detectada es transformada en una señal eléctrica y analizada usando la transformada de Fourier para obtener las frecuencias de resonancia del fruto. Con los datos de frecuencia y masa, obtuvieron el factor “*stiffness*” que está dado por la ecuación 22 y el cual tuvo una correlación con los valores de la firmeza obtenidos con la maquina universal de pruebas usando el método de compresión con platos paralelos (Figura 2-30 a).

$$S = f^2 m^{2/3} , \quad (21)$$

Donde S es el factor “*Stiffness*”, f es la frecuencia de resonancia del primer modo elíptico en Hz y m es la masa de la muestra.

Landhal *et al.*, (2005) estudiaron la sensibilidad de las técnicas impulso-acústico (AWETA B.V.) y Magness-Taylor para detectar el daño interno en manzanas de los cultivares ‘Elstar’ y ‘Jonagored’. En este trabajo de investigación las manzanas fueron sometidas a calentamiento utilizando un horno de microondas durante diferentes tiempos. Los resultados mostraron que la prueba acústica tiene una mayor sensibilidad para detectar el daño interno que la técnica Magness – Taylor. (véase Anexo 3)

De Ketelaere *et al* (2006) utilizaron el sensor acústico (AWETA B.V.) no destructivo para medir la calidad de manzanas con el objetivo de evaluar algunas características como repetitividad, sensibilidad y su correlación con el SIQ-FT. Los resultados mostraron que ambos equipos tienen repetitividad y la correlación entre las mediciones de ambos equipos fue en general alta ($r = 0,88$). En relación a la sensibilidad, el sensor acústico AWETA tuvo una incertidumbre menor que el SIQ-FT.

Duprat *et al.*, (1997), utilizaron el método de impulso acústico para analizar los valores obtenidos y relacionarlos con el grado de madurez de las manzanas (‘Golden Delicious’). El sistema de medición envía información a un programa que proporciona una rápida descripción visual del espectro y también indica el valor del pico de frecuencia con la mayor amplitud. El valor de esta frecuencia es utilizada para calcular el coeficiente de elasticidad dado en la siguiente ecuación:

$$E = f^2 m^{2/3} \rho^{1/3}, \quad (22)$$

Donde: E es el coeficiente de elasticidad (Pa), f es la frecuencia con mayor amplitud (Hz), m es la masa (kg) y ρ es la densidad (kg/m^3).

Ellos observaron que la técnica de impulso acústico permite obtener valores del fruto completo además de que las mediciones son rápidas, concluyendo que el coeficiente de elasticidad puede ser apropiado como una medición de la firmeza ya que refleja las propiedades mecánicas del fruto.

2.4.2.4 Sistemas ópticos

Dentro de las técnicas ópticas la Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIR) ha generado resultados interesantes para estimar varios parámetros de calidad en frutos, Nicolai *et al* (2007). Esta técnica mide el espectro reflejado de una muestra iluminada con luz de halógeno. La técnica NIR ha sido utilizada para estimar contenido de sólidos solubles totales, materia seca, firmeza y acidez. Lu (2001) utilizó esta técnica para medir de manera no destructiva la firmeza y contenido de azúcar en cerezas.

En los últimos años se ha extendido la técnica de **análisis de imagen multiespectral e hiperespectral** (“multi- and hyperspectral imaging systems imaging”) para medir los perfiles de dispersión de luz reflejada desde el fruto, en una selección de bandas espectrales en la región del infrarrojo cercano entre 680 y 1060 nm. Lu (2004) utilizó este sistema para medir la firmeza y la cantidad de sólidos solubles (CSS) en frutos como la manzana. Las longitudes de onda a 680 nm están relacionadas con la absorción de luz por la clorofila de los frutos, mientras que las λ en las regiones entre 440 y 738 y entre los 920 y 1060 nm están relacionadas con la firmeza.

Herrero (2010) en su tesis doctoral desarrolló un procedimiento para clasificar los melocotones en cuatro clases de madurez a partir de la toma de imágenes multiespectrales de reflectancia a 680 y 800 nm las cuales están altamente relacionadas con los valores de firmeza obtenidos con la prueba Magness-Taylor, principal referencia comercial para el manejo de esta fruta (véase Anexo 3).

Varios trabajos de investigación han estudiado el uso potencial de la difusión de la luz para estimar la firmeza o la madurez de los frutos. El proceso de ablandamiento del fruto está acompañado con los cambios en la densidad de los tejidos y la debilitación de las células, cambios que pueden afectar la dispersión de la luz. La técnica de análisis hiperespectral ha sido utilizada para estimar la maduración de los frutos (Lleó *et al.*, 2011), así como la firmeza de melocotón (Lu y Peng, 2006) y manzanas (Lu y Peng, 2008). Esta técnica de imagen hiperespectral permite obtener perfiles de difusión para las 153 bandas de ondas en 500 – 1000 nm a una resolución espectral de 3,28 nm. Debido a la gran cantidad de información adquirida por este sistema, esta técnica es particularmente útil en la identificación de longitudes de onda específicas para predecir la firmeza (véase Anexo 3).

Como se ha mencionado durante la maduración de los frutos el proceso de degradación de la clorofila es el responsable de la pérdida del color verde la cual está relacionada con el grado de madurez. Para medir el contenido de clorofila, el cual tiene relación con la madurez de frutos como las manzanas, peras y nectarinas; Bodria *et al.*, (2004) utilizaron un sistema óptico no destructivo, el cual mide la fluorescencia de la clorofila. Dos tipos de iluminación fueron utilizados: luz ultravioleta – visible con un rango de emisión limitado a 360 y 570 nm y una luz roja con un rango entre 630 y 670 nm. Con la primera fuente de iluminación se obtuvieron imágenes fluorescentes en las cuales los niveles de gris de los pixeles

presentaron una buena correlación con los valores de la firmeza de las manzanas. Con la fuente de luz de actinio roja, las imágenes de fluorescencia, obtenidas a partir de peras y nectarinas, presentaron una alta correlación con los valores de la firmeza.

Como se mencionó con esta técnica es posible estimar cambios en la firmeza y en la cantidad de sólidos solubles, sin necesidad de que haya un cambio de tonalidad en la piel. Las imágenes son digitalizadas y analizadas por medio de los valores de gris en las regiones de interés (zona ecuatorial, pedúnculo y cáliz). El análisis de las propiedades ópticas para medir el contenido de clorofila es una buena técnica no destructiva que puede proporcionarnos información de mucha utilidad sobre la maduración de frutos rojos.

Por otro lado, Valero (2001) en su tesis doctoral presentó los resultados de la aplicación de la Espectroscopia láser de reflectancia difusa (ERDT) para medir la calidad interna de manzanas, melocotones, nectarinas, kiwis, jitomates y melones. La reflectancia difusa predomina cuando los materiales de la superficie reflectante son débiles absorbentes a la longitud de onda incidente y cuando la penetración de la radiación es grande en relación a la longitud de onda. La profundidad de penetración de la luz y el efecto de la piel fueron dos aspectos considerados en este trabajo (véase Anexo 3).

2.4.2.5 Resonancia magnética nuclear

La técnica de Resonancia Magnética Nuclear (NMR, por sus siglas en inglés) mide las características internas basándose en las propiedades magnéticas de los núcleos

atómicos que constituyen el material (véase Anexo 3). Esta técnica mide las propiedades relacionadas a la madurez y a los defectos internos. La señal NMR puede ser relacionada al contenido químico de la muestra y su estructura interna, las cuales afectan la firmeza y las propiedades reológicas (García-Ramos *et al.*, 2005). Las señales de NMR también actúan como sensores de la integridad de los tejidos. Las frecuencias de resonancia de la espectroscopia de NMR codifican las poblaciones de núcleos químicamente equivalentes en diferentes ambientes electrónicos y químicos así que la información de salida es un espectro cuya intensidad es graficada versus frecuencia (Ruiz-Altisent *et al.*, 2010). Una de las más importantes aplicaciones de la NMR es la medición del contenido de agua y su distribución debido a que los núcleos del hidrogeno muestran una alta respuesta a los campos magnéticos. Estos equipos generalmente son grandes y costosos. Existen técnicas que derivan de la NMR y que generan imágenes a través de la resonancia magnética (MRI, por sus siglas en inglés) que permiten detectar el pardeamiento interno en frutos como la manzana. La ventaja de la NMR es que detecta las variaciones en la concentración y estado del agua en frutos y vegetales, lo cual es muy útil para estimar la madurez, detectar defectos o pudrición (Butz *et al.* 2005).

En el caso de la fresa la obtención de imágenes a través de la resonancia magnética se ha utilizado para detectar infecciones (Ruiz-Altisent *et al.* 2010).

2.4.3 Técnicas destructivas y no destructivas basadas en las propiedades eléctricas

2.4.3.1 Mediciones destructivas de la impedancia

Harker y Maindonald (1994) utilizaron la medición de la impedancia eléctrica para caracterizar cambios en la resistencia intra y extracelular, así como los cambios en las condiciones de las membranas durante la maduración del fruto de la nectarina. La impedancia se midió utilizando un generador funcional, un osciloscopio y cinco electrodos de plata. Utilizaron corriente alterna a frecuencias entre 50 Hz y 1 MHz la cual fue aplicada a un bloque del tejido de la nectarina, midiendo la impedancia inter electrodos a distancias de 10, 20 y 30 mm. La impedancia fue separada en sus componentes resistivos y reactivos (la reactancia está relacionada con la capacitancia del tejido). Solamente la resistencia y la reactancia del tejido fueron consideradas. Los resultados mostraron que conforme disminuye la firmeza del fruto entero, la cual fue medida utilizando un penetrómetro manual marca Effegi, disminuye la resistencia R_1 (véase Figura 2-17 A), de la pared celular de 7181 a 3342 Ω .

Esta disminución puede estar relacionada con un incremento en la concentración de iones móviles en la pared celular o un incremento en la sección transversal de la pared celular accesible a la corriente de bajas frecuencias. La resistencia R_2 disminuye desde 4817 a 1861 Ω . Esto indica cambios considerables en la resistencia del citoplasma o membrana durante la maduración. Ellos concluyeron que la medición de la resistencia a bajas frecuencias puede dar información acerca de los cambios en el ambiente extracelular durante la maduración de la nectarina.

Harker *et al.*, (2000) utilizaron la espectroscopia de impedancia eléctrica para evaluar los cambios, durante el almacenamiento, en la resistencia eléctrica del apoplasto y simplasto (Figura 2-31) en fresas de la variedad ‘Pájaro’. La impedancia eléctrica del fruto entero fue medida usando un analizador LCR. Dos electrodos de Ag/AgCl son insertados en la pulpa, separados a una distancia de 2 cm. Utilizando corriente alterna a frecuencias de 50 Hz y 1 MHz. Generalmente, las mediciones a bajas frecuencias son usadas para determinar la resistencia del apoplasto, mientras que a altas frecuencias se determina la resistencia del tejido que es en gran parte la resistencia del simplasto. Ellos observaron que a 50 Hz la resistencia es menor en fresas almacenadas y sometidas a tratamiento con CO₂ que las que estuvieron sólo con aire. A 1 MHz la resistencia en frutos en ambos tratamientos no fue estadísticamente diferente.

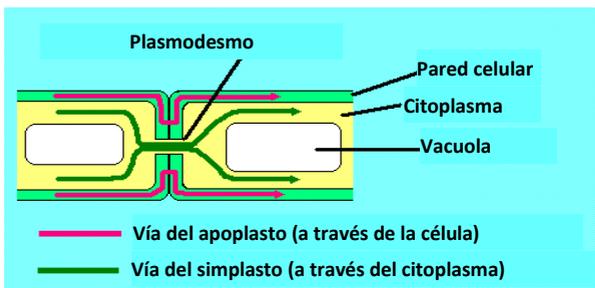


Figura 2-31. Esquema de dos células que muestra el apoplasto y simplasto, <http://en.wikipedia.org/wiki/Apoplast>

Harker y Forbes (1997) utilizaron la espectroscopia de impedancia eléctrica para monitorear la maduración y el daño por frío del caqui (*Dyospyros kaki* L. ‘Fuyu’). Los valores de la resistencia y reactancia del tejido fueron obtenidos utilizando frecuencias entre 50 Hz y 1 MHz. Ellos utilizaron el diagrama de circuito “A” mostrado en la Figura 2-17 que incluye la resistencia de la pared celular (R_1), citoplasma (R_2) y vacuola (R_4) y capacitancia de la membrana plasmática (C_3). Ellos encontraron que la R aumenta durante los primeros 21 días de almacenamiento para después disminuir. Este fenómeno puede ser explicado por la reducción

transitoria en la concentración de iones libres o por un incremento transitorio de compuestos aislantes como los azúcares. La capacitancia de la membrana plasmática y del tonoplasto incrementa durante la maduración a 20 °C con o sin almacenamiento en atmósferas controladas. Esto sugiere que puede haber tanto un incremento del área de la membrana como un incremento en la capacitancia específica de las membranas durante la maduración.

Inaba *et al.* (1995) aplicaron un rango de frecuencias de corriente alterna de 500 Hz a 1 MHz para analizar la impedancia eléctrica de las propiedades del tejido del pepino (*Cucumis sativus* L.), con el propósito de entender la relación entre los componentes de la impedancia y la inducción de biosíntesis del etileno utilizando corrientes eléctricas. Las diferentes capacitancias obtenidas representan las membranas plasmáticas y los orgánulos, y las resistencias representan el espacio extracelular, citoplasma y el interior de los orgánulos. Para medir la impedancia eléctrica se insertaron tres electrodos de platino de 0,5 mm de diámetro, separados a una distancia de 1 cm. Observaron en este trabajo, que la inhibición de la producción de etileno reduce de manera significativa el incremento de la resistencia del espacio extracelular y parcialmente de la capacitancia de la membrana plasmática.

Jackson *et al* (2000), utilizaron la impedancia eléctrica para determinar el grado de daño ocurrido en el tejido como resultado del daño por impacto en dos variedades de manzana. Utilizaron dos electrodos de Ag/AgCl (2 mm de diámetro y 5 mm de longitud) que fueron introducidos dentro del fruto a una profundidad de 3 mm y separados a una distancia de 35 mm. Los valores de la resistencia y reactancia, componentes de la impedancia eléctrica, fueron obtenidos utilizando frecuencias entre 50 Hz y 1 MHz utilizando un equipo LCR (inductancia, capacitancia y

resistencia) de precisión. Una vez realizada las mediciones de la impedancia, los electrodos fueron retirados, se impacto el fruto (dejándolo caer de alturas de 10, 20, 30 y 50 cm) e inmediatamente se hicieron nuevamente las mediciones de la Z. Encontraron que la resistencia a 50 Hz antes y después del daño por impacto depende de la variedad y de la temperatura de almacenamiento, así como una alta correlación entre el cambio de los valores de ΔR ($\Delta R = R_1$ (R antes del daño por impacto) – R_2 (R después del daño por impacto) y el grado de daño debido a la altura de caída. Dicha correlación fue consistente en las dos variedades.

Benavente *et al.* (1998) utilizaron la espectroscopia de impedancia para establecer los diferentes entornos químicos que toman lugar en la interfase de diferentes membranas cuticulares del jitomate (cutícula de fruto inmaduro y maduro y cutina). Las mediciones de la impedancia se realizaron con un analizador FRA (Solartron 1255). Las mediciones para 100 diferentes frecuencias desde 50 Hz hasta 10^7 Hz fueron realizadas a 25 °C., utilizando un voltaje de 0,02 V. Las membranas aisladas fueron tratadas con diferentes concentraciones de NaCl. El análisis de los datos se realizó con el método del plano complejo de la impedancia Z^* el cual gráfica la parte imaginaria de la impedancia contra la parte de real (gráfica de Nyquist). Como se comentó con anterioridad, cuando se gráfica sobre una escala lineal la ecuación para un circuito paralelo RC da lugar a un semicírculo en el plano de la Z^* , siendo RC el tiempo de relajación. Sin embargo en sistemas complejos pueden presentarse diferentes tiempos de relajación y en estos casos la gráfica de la impedancia es un semicírculo deprimido y un capacitor no ideal es considerado, el cual es llamado un elemento de fase constante (CPE). A partir de las gráficas de impedancia obtuvieron los circuitos equivalentes para los diferentes sistemas en estudio. De estos circuitos obtuvieron los valores de la resistencia cuticular,

impedancia Warburg y las capacitancias. Encontrando una alta relación entre la resistencia y la concentración de sal (NaCl).

Montoya *et al.* (1994 - A) midieron la conductividad eléctrica del aguacate y la pera, variable eléctrica que puede caracterizar materiales eléctricamente conductivos. Para esto, utilizaron dos electrodos de alambre de platino (4 cm de longitud y 0,4 mm de diámetro) con una separación de 10 mm y una profundidad de penetración de 10 mm. El platino es naturalmente inerte, tiene buena conductividad eléctrica, resistente y con características de polarización muy baja. Ellos determinaron la conductividad eléctrica σ , a partir de la ecuación 23.

$$\sigma = \frac{R_s}{R_f} \sigma_s \quad , \quad (23)$$

Donde σ_s = conductividad de la solución estándar 0,01 mol/L KCl a 1kHz; R_s = resistencia entre la punta de los electrodos inmersos en la solución a 1kHz y R_f resistencia entre la punta de los electrodos inmersos en la pulpa del fruto.

Los valores de las resistencias se obtuvieron utilizando un medidor de impedancia Hewlett – Packard 4276. En la Figura 2-32 se muestra el diagrama de circuito equivalente utilizado por Montoya *et al.* (1994). El circuito fuera de la línea punteada muestra el modelo físico del electrodo y el medio biológico. R_f y C_f representan la impedancia de la muestra. Ellos concluyeron que los análisis de la frecuencia y la temperatura indican que la conducción eléctrica en el mesocarpio es electrolítica. La conductividad es menor en el aguacate que en la pera a pesar de que la pera es un fruto rico en agua y ácidos orgánicos de bajo peso molecular (electrolitos débiles) y el aguacate un fruto con poco agua y rico en ácidos orgánicos de alto peso molecular (baja conductividad).

La conductividad eléctrica puede ser un índice viable para medir la calidad (grado de madurez y daño por frío) del aguacate durante su almacenamiento (Montoya *et al.*, 1994 - B).

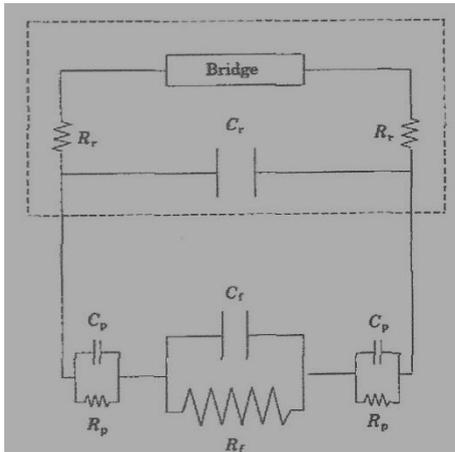


Figura 2-32. Diagrama del circuito equivalente del sistema electrodo y de la conductividad del medio. R_r y C_r representan la resistencia y capacitancia de los electrodos. R_p y C_p representan la polarización de la impedancia en los electrodos. R_f y C_f representan la impedancia de la muestra. Montoya *et al.* (1994 - A)

Bauchot *et al.* (2000), estudiaron la impedancia eléctrica y su relación con el proceso de maduración del fruto del kiwi. Las mediciones se realizaron en el fruto completo y a muestras de tejido del pericarpio (epicarpio, mesocarpio y endocarpio). En ese trabajo se usaron frecuencias de corriente alterna en un rango de 50 Hz a 1 MHz. Cuatro alambres de plata (0,5 mm de diámetro) en arreglo linear con una distancia interelectrodo de 10 mm fueron insertados en los tejidos y en el fruto completo. Utilizando el modelo eléctrico de la Figura 2-17 A obtuvieron los valores de las resistencias del apoplasto, citoplasma y vacuola, y capacitancias de la membrana plasmática y tonoplasto. Durante la maduración encontraron pequeños cambios en la impedancia del fruto, a pesar de los cambios significativos en la firmeza. Sin embargo, en otros experimentos con nectarina, caqui y jitomate se ha

visto una reducción considerable en la impedancia durante la maduración (Bauchot *et al*, 2000).

2.4.3.2 Mediciones no – destructivas de la impedancia

Rehman *et al.* (2011) desarrollaron una técnica no destructiva de espectroscopia de impedancia que permite evaluar las condiciones de los frutos que son cosechados con la ayuda de brazos robóticos. Con esta técnica midieron la impedancia de mangos inmaduros, maduros y sobre maduros. En la Figura 2-33, se muestra el circuito eléctrico equivalente utilizado por los autores para medir la capacitancia eficaz y la resistencia eficaz.

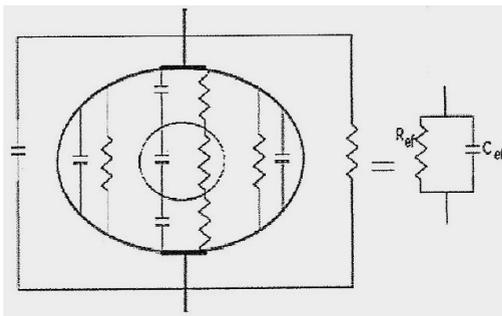


Figura 2-33. Circuito eléctrico equivalente para el mango. R_{ef} , resistencia eficaz y C_{ef} , capacitancia eficaz. Rehman *et al.* (2011)

Para obtener las gráficas de resistencia eficaz vs frecuencia y capacitancia eficaz vs frecuencia utilizaron un rango de frecuencia de 1 a 200 kHz. Dos electrodos de 5mm de diámetro, uno de bajo potencial y otro de alto potencial fueron colocados alrededor del diámetro ecuatorial (perpendicular a la sección longitudinal) en sentido opuestos. El dispositivo experimental para realizar las mediciones (Figura 2-34) permite utilizar frutos con un máximo de 7,2 cm de ancho y una altura máxima de 8,5 cm. La masa del fruto es medida con la ayuda de una báscula colocada en la parte inferior del dispositivo. La temperatura es controlada con un ventilador de

escape. Concluyeron que la caracterización de mangos inmaduros y maduros a través de la espectroscopia de impedancia puede ser simple y de bajo costo a bajas frecuencias. El efecto de la variación aleatoria de la temperatura no es tan significativo como el grado de madurez del fruto. La proporción entre la resistencia eficaz del mango maduro e inmaduro medida a 1kHz es de 6,8, mientras que la proporción entre la capacitancia eficaz de los frutos maduros e inmaduros es de 1/3,3. Por lo tanto, la resistencia eficaz y la capacitancia eficaz pueden ser usadas para diferenciar entre frutos inmaduros y maduros. En relación al peso del fruto, encontraron que la resistencia incrementa en un 8,4% por gramo, mientras que la capacitancia incrementa en un 3,7 %.

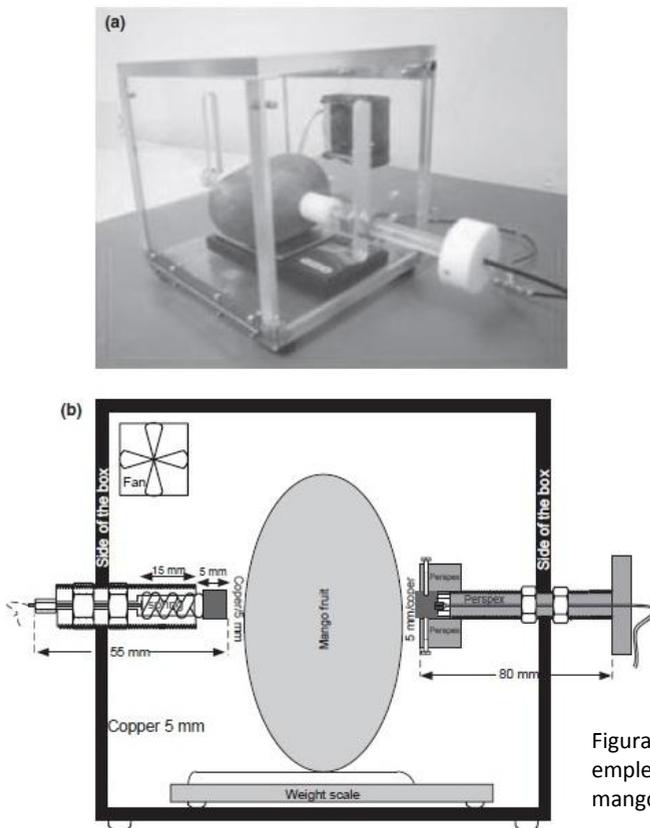


Figura 2-34. Detalle del dispositivo empleado para medir la impedancia del mango. Rehman *et al.* (2011)

Vozáry y Benko (2010) utilizaron el siguiente modelo eléctrico (ecuación 24) formado por un arreglo en serie de tres elementos distribuidos y una resistencia (Ohms) con el objetivo de obtener los espectros de impedancia tanto de manzanas con y sin cáscara.

$$R + \frac{R_1}{1 + (i \tau_1 \omega)^{\varphi_1}} + \frac{R_2}{1 + (i \tau_2 \omega)^{\varphi_2}} + \frac{R_3}{1 + (i \tau_3 \omega)^{\varphi_3}} \quad (24)$$

Para las mediciones se utilizaron electrodos de Ag/AgCl de 10 mm de diámetro separados a una distancia de 2 cm. Para asegurar el contacto eléctrico entre la muestra y los electrodos se utilizó gel conductor. Las mediciones de impedancia se llevaron a cabo en un rango de frecuencia de 30 Hz a 1MHz. Ellos encontraron que la resistencia en manzanas con cáscara es mayor que las muestras sin cáscara.

En la siguiente Tabla se presenta en orden cronológico un resumen de los diferentes trabajos relacionados con la medición destructiva y no destructiva de las propiedades eléctricas de los frutos mencionados en este Capítulo.

Tabla 2-6.

Resumen de trabajos de investigación relacionados con la medición destructiva y no destructiva de las propiedades eléctricas de materiales biológicos.

TÉCNICAS DESTRUCTIVAS							
Artículo	Autores	Año	Producto	Objetivo	Frecuencia utilizada / Número y material de los electrodos	Modelo de circuito eléctrico	Principales conclusiones
Ripening of nectarine fruit. Changes in the cell wall, vacuole, and membranes detected using electrical impedance measurements.	F. Roger Harker and John H. Maindonald	1994	Nectarina	Caracterizar la impedancia de bloques de tejido de la nectarina, teniendo cuidado en diferenciar los efectos del tejido y los electrodos.	De 50 Hz a 1 MHz / Arreglo lineal de cinco electrodos de plata.	Véase Figura 2-17 A	La R medida a bajas frecuencias está relacionada con los cambios en el medio extracelular. La R a altas frecuencias, la cual es asociada principalmente a la R de la vacuola, se mantuvo constante durante la maduración. Se observó una disminución de la R del citoplasma durante la maduración lo que puede ser debido a un aumento en la permeabilidad de la membrana
Electrical conductivity of avocado fruits during cold storage and ripening.	M.M. Montoya, J. L. De La Plaza y V. López-Rodríguez	1994	Aguacate	Medir la conductividad eléctrica del aguacate durante su almacenamiento bajo diferentes condiciones de temperatura (6°C y 4°C) y condiciones atmosféricas (normal y modificada).	De 214 Hz, 615 Hz, 1kHz, 5kHz, 10 kHz y 20kHz.		La conductividad eléctrica puede ser un índice viable para medir la calidad del aguacate durante su almacenamiento. Su medición es sencilla, y rápida. Dos factores independientes de los cambios en la conductividad han sido detectados. El primero es debido a la maduración incrementando la conductividad al máximo y decreciendo lentamente y el segundo es el aumento de la conductividad asociado con la aparición de desórdenes fisiológicos tanto por la senescencia como por el daño por frío.
An improved technique for measuring the electrical conductivity of intact fruits	M.M. Montoya, V. López - Rodríguez y J.L. De La Plaza	1994	Aguacate y pera	Determinar si hay una correlación entre los cambios de las propiedades eléctricas y el desarrollo metabólico del fruto.	De 214 Hz, 615 Hz, 1kHz, 5kHz, 10 kHz y 20kHz. / dos electrodos de platino	Véase Figura 2-30	Los estudios de la frecuencia indican que la conductividad eléctrica en el mesocarpio de la fruta es electrolítica. La conductividad en la pera es menor que en el aguacate a pesar de que la pera es un fruto con un contenido de agua elevado y ácidos orgánicos de bajo peso molecular (electrolitos débiles), mientras que el aguacate contiene menos agua y es rico en ácidos orgánicos de alto peso molecular (Baja conductividad).

Artículo	Autores	Año	Producto	Objetivo	Frecuencia utilizada / Número y material de los electrodos	Modelo de circuito eléctrico	Principales conclusiones
Electrical impedance analysis of tissue properties associated with ethylene induction by electric currents in cucumber fruit	Akitsugu Inaba, Taro Manabe, Hiroyuki Tsuji, and Tomotada Iwamoto	1995	Pepino	Analizar los cambios causados por la aplicación de corriente en la impedancia del tejido simultáneamente con la inducción de la biosíntesis de etileno	Frecuencias de 500 Hz a 1 MHz. / Tres electrodos de platino	Véase Figura 2-17 A	La inhibición de la producción de etileno reduce de manera significativa el incremento de la resistencia del espacio extracelular y parcialmente de la capacitancia de la membrana plasmática. Usando el análisis de impedancia se observó que la corriente directa induce cambios importantes en la impedancia del tejido con bruscos incrementos en C_2 , R_1 y R_2 , y un lento incremento en C_1 . La inhibición de la producción de etileno eliminó completamente el incremento de R_1 y no tuvo efecto sobre el incremento de C_2 y R_2 . Lo que sugiere que los incrementos de estas dos variables eléctricas están relacionados con la inducción de etileno con corriente directa.
Ripening and development on chilling injury in persimmon fruit: an electrical impedance study	F. Roger Harker y Shelley K. Forbes	1997	Caqui	Investigar la capacidad de las mediciones de la IE para proporcionar información relevante sobre la fisiología de la madurez del fruto.	14 frecuencias desde 50 Hz a 1 MHz y desde 50 hasta 300 kHz. / Cinco electrodos de plata con una separación interelectrodo de 10, 20 y 30 mm	Véase Figura 2-17 A	Los resultados obtenidos demostraron los cambios fisiológicos complejos que ocurren durante el almacenamiento y maduración del caqui. El resultado más interesante fue el rápido y transitorio incremento en R durante los primeros 21 días a 20 °C. Esto puede ser debido a la reducción transitoria en la concentración de los iones libres en el tejido o por el incremento transitorio de compuestos aislantes como los azúcares.
A study of the electrical behaviour of isolated tomato cuticular membranes and cutin by impedance spectroscopy measurement.	J. Benavente, J. R. Ramos-Barrado y A. Heredia	1998	Jitomate	Determinar los parámetros electroquímicos asociados a los diferentes procesos de relajación, los cuales dan información relevante sobre el rol de los diferentes componentes que forman la interfase de las células vegetales	100 frecuencias de 50 Hz a 10^7 Hz. / Dos electrodos de oro		A través de las gráficas Bode (impedancia imaginaria, Z'' versus frecuencia angular, ω encontraron para las diferentes muestras en estudio (cutícula de fruto maduro e inmaduro y cutina) las regiones de relajación a diferentes frecuencias y a través de las gráficas de Nyquist (impedancia imaginaria, Z'' versus impedancia real, Z' , obtuvieron los diferentes comportamientos dieléctricos para cada membrana. (obtención de los circuitos equivalentes)

Artículo	Autores	Año	Producto	Objetivo	Frecuencia utilizada / Número y material de los electrodos	Modelo de circuito eléctrico	Principales conclusiones
Apple bruise detection by electrical impedance measurement	Phillipa J. Jackson and F. Roger Harker	2000	Manzana	Determinar si las medidas de EIS realizadas con electrodos colocados en lados opuestos de la magulladura, fuera de la región del daño, pueden proporcionar información sobre la dimensión y el peso de una magulladura.	De 50 Hz a 1 MHz / dos electrodos de Ag/AgCl		La medición inicial de la resistencia no fue influenciada por el peso del fruto. El tipo de variedad y la temperatura tuvieron influencia en la R 50Hz. Se encontró una alta correlación entre ΔR y el grado de daño para ambas variedades. Este estudio confirma que las mediciones de la impedancia eléctrica particularmente ΔR a 50Hz se correlacionan con el daño físico, magulladura, provocado en la muestra. La EIS mostró un potencial considerable para evaluar el daño en frutos. Con un mayor desarrollo de la metodología se pueden obtener estimaciones rápidas y convenientes del volumen y peso del daño inmediatamente después del impacto.
The use of electrical impedance spectroscopy to assess the physiological condition of kiwifruit	Anne D. Bauchot, F. Roger Harker, W. Michael Arnold	2000	Kiwi	Examinar las características de impedancia de tejidos individuales, pericarpio externo e interno y corazón, así como del fruto completo durante el proceso de maduración.	36 frecuencias de 50 Hz a 1 MHz. / Dos electrodos de Ag/AgCl	Véase Figura 2-17 A	Durante la maduración se identificaron pequeños cambios en la impedancia del fruto, a pesar de los cambios significativos en la firmeza. Las mediciones de la fuga de electrolitos pueden ser muy útiles cuando se mida la impedancia eléctrica en frutos. Las diferencias en las R a 50 Hz y 1MHz de los tejidos del pericarpio y del centro pueden explicarse a través de las diferencias en la firmeza y el volumen del fluido extracelular, así como en las diferencias en el contenido iónico y de azúcar en la célula. Sin embargo la impedancia de estos tejidos no presenta cambios importantes durante la maduración.
Physical and mechanical changes in strawberry fruit after high carbon dioxide treatments	F. Roger Harker, H. John Elgar, Christopher B. Watkins, Phillipa J. Jackson y Ian C. Hallet	2000	Fresa	Investigar la influencia del CO ₂ sobre la firmeza de la fresa variedad 'Pájaro' tanto en la cosecha como en el almacenamiento y examinar este efecto sobre las características celulares y del tejido.	De 50 Hz y 1 MHz / Dos electrodos de Ag/AgCl		A 50 Hz la R (apoplasto) fue menor en fresas almacenadas y sometidas a tratamiento con CO ₂ que las que no fueron tratadas. La R a 1MHz (simplasto) no presento cambios significativos. Esto indica un incremento de electrolitos dentro de la solución extracelular. Los electrolitos que probablemente aportan para disminuir la resistencia del tejido son los iones (H ⁺) y el bicarbonato (HCO ₃ ⁻).

TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS							
Artículo	Autores	Año	Producto	Objetivo	Frecuencia utilizada / Número y material de los electrodos	Modelo de circuito eléctrico	Principales conclusiones
Non - destructive determination of impedance spectrum of fruit flesh under the skin	E. Vozary y P. Benko	2010	Manzana	Determinar el espectro de impedancia de la pulpa de la manzana con y sin cáscara.	De 30 Hz a 1 MHz. / electrodos de Ag/AgCl		Ellos encontraron que la resistencia en manzanas con cáscara es mayor que las muestras sin cáscara. Los parámetros R y tiempo de relajación en el modelo que incluye dos elementos de distribución puede ser usado para caracterizar el estado de la pulpa de la manzana.
Assessment of Quality of fruits using impedance spectroscopy	Mahfoozur Rehman, Basem A.J.A. Abu Izneid, Mohd Zaid Abdullah y Mohd Rizal Arshad	2011	Mango	A través de la impedancia valorar el proceso de maduración del fruto.	De 1 a 200 kHz. / Dos electrodos de bajo y alto potencial.	Véase Figura 2-33	Concluyeron que la caracterización de mangos inmaduros y maduros a través de la espectroscopia de impedancia puede ser simple y de bajo costo a bajas frecuencias. El efecto de la variación aleatoria de la temperatura no es tan significativo como el grado de madurez del fruto. La proporción entre la resistencia eficaz del mango maduro e inmaduro medida a 1kHz es de 6,8, mientras que la proporción entre la capacitancia eficaz de los frutos maduros e inmaduros es de 1/3,3. Por lo tanto, la resistencia eficaz y la capacitancia eficaz pueden ser usadas para diferenciar entre frutos inmaduros y maduros. En relación al peso del fruto, encontraron que la resistencia incrementa en un 8,4% por gramo, mientras que la capacitancia incrementa en un 3,7%.

CAPÍTULO 3

Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la aplicabilidad de una técnica para la medida no destructiva de la impedancia bio-eléctrica de tres variedades ('Sweet charlie', 'Festival' y 'Camino real') de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch) para la estimación del "*grado de madurez*" preestablecido y la firmeza destructiva.

3.2 Objetivos específicos

- I. Diseño, construcción y evaluación del dispositivo para medir la impedancia bio-eléctrica de tres lotes de distintas variedades de fresa.
- II. Determinación de la relación del "*grado de madurez*" subjetivo de tres lotes de distintas variedades de fresa con las medidas obtenidas mediante técnicas convencionales (coordenadas de color L^* , a^* , b^* y firmeza destructiva).
- III. Determinación del "*grado de madurez*" subjetivo de tres lotes de distintas variedades de fresa en función de las variables de impedancia bio-eléctrica.
- IV. Estimación de la firmeza destructiva de tres lotes de distintas variedades de fresa en función de las variables de color y de impedancia bio-eléctrica.

CAPÍTULO 4

Materiales y métodos

4.1 Plan de trabajo desarrollado

En la Figura 4-1 se muestra el diagrama con las diferentes actividades desarrolladas dentro del plan de trabajo realizado.

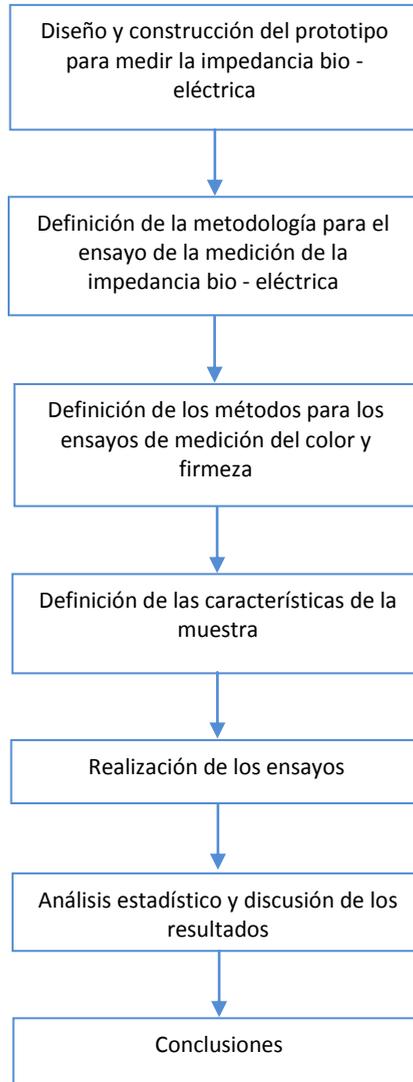


Figura 4-1. Diagrama del plan de trabajo realizado

4.2 Material biológico

El material biológico utilizado para este trabajo corresponde a fresas de las variedades 'Sweet charlie', 'Festival' y 'Camino real' (Figura 4-2) las cuales fueron seleccionadas por su disponibilidad durante los periodos de los ensayos. Los frutos se recolectaron en el ejido Serrano, ubicado en el municipio de Irapuato, Estado de Guanajuato, en México. En total se utilizaron 418 fresas de las cuales 118 fueron de la variedad 'Sweet charlie', 150 'Festival' y 150 'Camino real'.

La gran mayoría de los suelos en Guanajuato son franco arcilloso, se emplea riego por gravedad (por surco) y el agua es de pozo. Para evitar las plagas se utilizan controladores biológicos principalmente. En la Figura 4-3 se muestra un panorama general del campo de cultivo.



Figura 4-2. Variedades de fresa utilizadas. a) 'Sweet charlie', b) 'Festival', c) 'Camino real'.



Figura 4-3. El autor en el campo de cultivo de la fresa. Ejido Serrano, Irapuato, Gto.

4.3 Características del equipo e instrumentos de medición utilizados

4.3.1 Refrigeración

Para el almacenamiento y transporte de la fresa se utilizó un refrigerador portátil MT060 con compresor 12/220 V marca ENGEL (Figura 4-4), con ajuste de temperatura variable lo que permitió almacenar inmediatamente la fresa a 4 °C una vez que fue cosechada. Con el propósito de minimizar cualquier tipo de daño mecánico las muestras fueron colocadas en bandejas de cartón utilizadas para almacenar huevo.



Figura 4-4. Refrigerador portátil, marca ENGEL.

4.3.2 Medición del peso

Las mediciones de peso se realizaron con una balanza analítica marca Explorer OHAUS con capacidad máxima de 210 g, precisión de 0,1 mg y un rango de temperatura de trabajo de 10 a 40 °C.

4.3.3 Medición del diámetro ecuatorial

Un calibrador tipo vernier o pie de rey fue utilizado para llevar a cabo las mediciones de tamaño en base al diámetro ecuatorial y polar del fruto. La norma NMX-FF-9-1982 “Productos alimenticios no industrializados para uso humano – fruta fresca – determinación del tamaño en base al diámetro ecuatorial” establece el método para determinar el tamaño de la fruta fresca (véase Anexo 2).

4.3.4 Medición del color

Los ensayos de las mediciones de color se realizaron de manera objetiva utilizando un espectrofotómetro portátil serie CM-508d marca MINOLTA (Figura 4-5a) el cual mide la reflectancia espectral de la luz y a continuación calcula los valores triestímulos basándose en las ecuaciones para las funciones del observador estándar. El equipo puede medir, procesar datos y mostrar los datos numéricos del color así como un gráfico de la reflectancia espectral del color. Consta de múltiples sensores espectrales y una microcomputadora a 16 MHz - 32-bit, que permite realizar mediciones a alta velocidad y exactitud de la reflectancia espectral desde 400 hasta 700 nm. La fuente de luz está constituida por una lámpara de xenón pulsante. La superficie de la muestra es iluminada a un ángulo de 45° sobre la normal. La luz reflejada por la muestra es recibida por el sensor espectral que está dividido en dos secciones la primera recibe la luz reflejada por la superficie de la

muestra y la segunda monitorea la luz dentro de la esfera integrada. La geometría del instrumento y su diseño permite que el componente especular sea incluido (SCI, por sus siglas en inglés) o excluido (SCE, por sus siglas en inglés). En el modo SCE, la reflectancia especular está excluida de la medición y sólo se mide la reflectancia difusa. Cuando se utiliza el modo SCI, la reflectancia especular está incluida con la reflectancia difusa durante el proceso de medición. Este modo de evaluación del color mide el aspecto total, independiente de las condiciones de la superficie. Los sensores convierten la luz en corriente eléctrica, proporcional a la intensidad de la luz, y ésta a su vez en señales digitales. En la Figura 4-5b se muestra un esquema del principio de medida del espectrofotómetro (Konica Minolta Sensing, Inc, 2007).

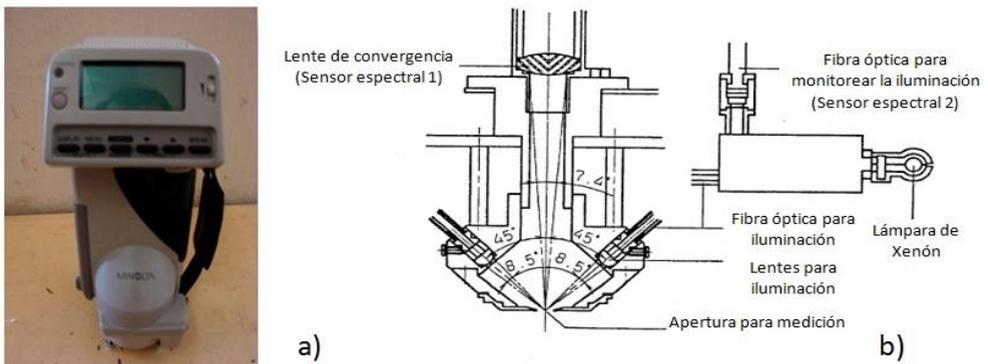


Figura 4-5. a) Espectrofotómetro serie CM-508d marca MINOLTA, b) principio de iluminación.

4.3.5 Medición de la impedancia bio-eléctrica

Para llevar a cabo las mediciones no destructivas, de la impedancia bio-eléctrica se diseñó, construyó y probó el dispositivo que se muestra en la Figura 4-8. Algunas

consideraciones que se tomaron en cuenta para el diseño y construcción de este dispositivo fueron: 1) asegurar el contacto entre la superficie del fruto y los electrodos, 2) que al momento del contacto los ejes de simetría tanto del electrodo como de la muestra fueran perpendiculares, 3) que se adaptara a diferentes tamaños de muestra ya que la fresa presenta una variabilidad importante entre las diferentes variedades por lo que el rango de diámetro permitido por el prototipo es de 1,8 a 4,0 cm, 4) minimizar en lo posible el daño mecánico, 5) que las mediciones se realizaran de manera no destructiva, 6) que fuera económico, 7) que fuera de fácil manejo, y 8) que tuviera repetibilidad (r). En relación a la repetibilidad del equipo se llevaron a cabo pruebas en las que las condiciones de esta cualidad incluyen: el mismo procedimiento de medición, el mismo operador, el mismo prototipo utilizando las mismas condiciones, el mismo lugar y repetición dentro de un período de tiempo corto. Para calcular r se utilizó la siguiente ecuación (Harper 1994):

$$r = \frac{B-W}{B+(N-1)W} \quad , \quad (25)$$

donde B es la varianza entre individuos, W , la varianza dentro de los individuos y N , es el número de repeticiones. Valores de r mayores a 0,70 puede considerarse como un equipo que tiene repetibilidad, aunque para considerarlo verdaderamente fiable se recomiendan valores mayores a 0,90.

Algunas ideas preliminares sobre el diseño se muestran en la Figura 4-6. Como se puede observar, éstas implicaban el diseño de dos mecanismos: uno para sujetar la muestra y otro que asegurar el contacto de los electrodos con la superficie del fruto. Estas dos acciones requieren de tiempo para realizar las mediciones, por lo que el diseño que se seleccionó permite llevar a cabo las pruebas con mayor

rapidez. El dispositivo que se muestra en la Figura 4-8 fue utilizado para realizar los ensayos de medición de la impedancia bio – eléctrica. Este consta de una base de nylacero de forma cilíndrica que sirve como recipiente para colocar la muestra.

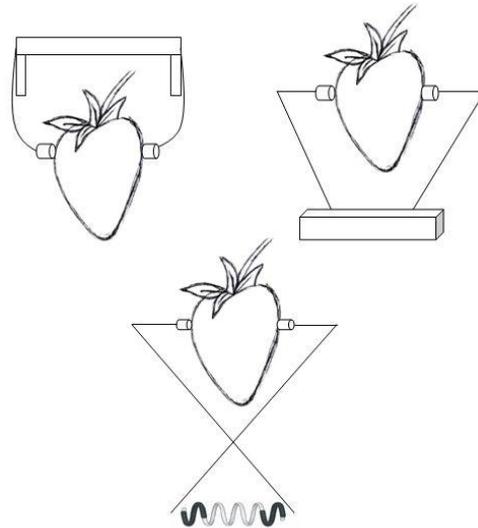


Figura 4-6. Bosquejos preliminares sobre el diseño del prototipo para medir impedancia en la fresa.

Para la medición de la impedancia se han utilizado diferentes números de electrodos. En este trabajo se utilizaron cuatro electrodos de cobre con punta de 6,0 mm de diámetro y longitud de 31 mm, ordenados como se muestran en la Figura 4-7. Estos se desplazan de manera manual y perpendicular al eje de simetría de la muestra. Debido a la irregularidad de la superficie de la fresa, y con el propósito de asegurar un buen contacto eléctrico de los cuatro electrodos con el fruto, se utilizó gel conductor (Vozáry y Benko, 2010). Los electrodos 1 y 2 son los que generan la corriente la cual genera un campo eléctrico en el interior del fruto. Mientras que los electrodos 3 y 4 son los que miden la intensidad de dicha corriente.

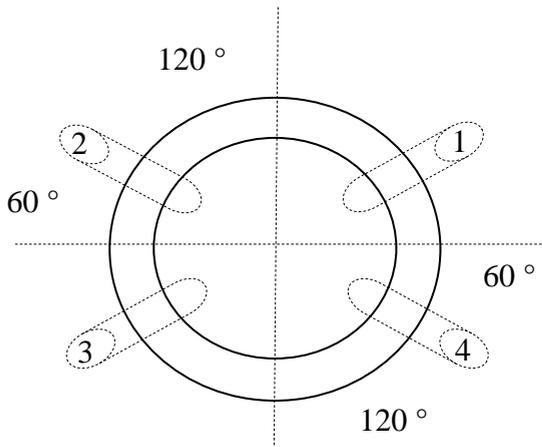


Figura 4-7. Arreglo de los 4 electrodos de cobre. Los electrodos 1 y 2 son la fuente de corriente mientras que 3 y 4 son los que miden la intensidad de dicha corriente.

Asimismo, los cuatro electrodos utilizados para llevar a cabo las mediciones están conectados a un analizador de impedancia marca Solartron SI 1260, por medio de una interfaz modelo 1294, de la misma marca, éste a su vez a un equipo de cómputo el cual por medio de los programas Z-Plot y Z-View se programan y controlan las mediciones y, se registran, almacenan y procesan los datos obtenidos durante las pruebas.

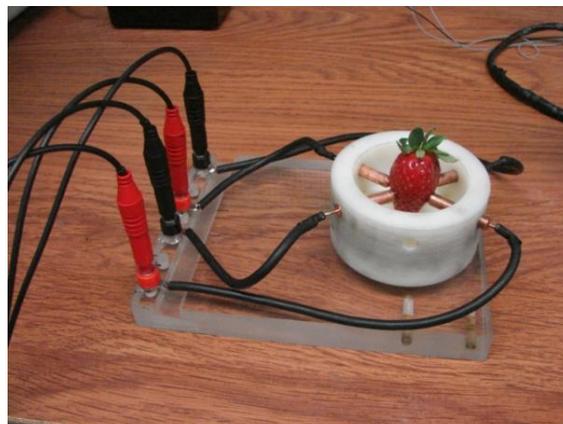


Figura 4-8. Dispositivo para medir impedancia bio-eléctrica.

4.3.6 Medición destructiva de la firmeza

Para realizar las mediciones de la firmeza se utilizó un Texturómetro marca Stable Micro Systems serie TA.TX2 (Figura 2-27). Este equipo tiene la ventaja de controlar la velocidad de descenso de la probeta que puede ser entre 10 mm/s y 0,1 mm/s. Cuenta con una celda de carga ("*load cell*") que es capaz de registrar fuerzas de 1mN hasta 300 N como máximo. El interfaz de comunicación y control está equipado con una salida analógica de fuerza y de distancia. El programa XTRAD permite visualizar los datos en formato gráfico en pantalla y tratarlos mediante macros automáticas para obtener los parámetros deseados como picos, áreas, gradientes y promedios. La calibración de la celda de carga se realizó antes de iniciar cada uno de los ensayos.

4.4 Metodología

4.4.1 Muestreo

El corte de la fresa se realizó al inicio de la jornada laboral (8:00 am) y para su clasificación se utilizaron dos criterios, ambos mencionados en la norma NMX-FF-062-SCFI-2002. El primero, "*grado de madurez*", se midió de manera visual utilizando como referencia la tabla de clasificación de los estados de maduración de la fresa a través de los colores (Figura 4-9). Se trata de una medida del color superficial del fruto de la fresa mediante cartas de color y no una medida cuantitativa del estado de madurez combinando diferentes parámetros químicos y de textura. Por esta razón lo hemos marcado en este documento como "*grado de madurez*", aunque se trata de una apreciación subjetiva del color relacionada con el estado de madurez; y el segundo criterio fue el tamaño (Tabla 4-1), el cual se midió de manera objetiva utilizando un calibrador tipo Vernier y tomando como

referencia los rangos mencionados en la tabla de especificaciones de tamaño (diámetro ecuatorial).

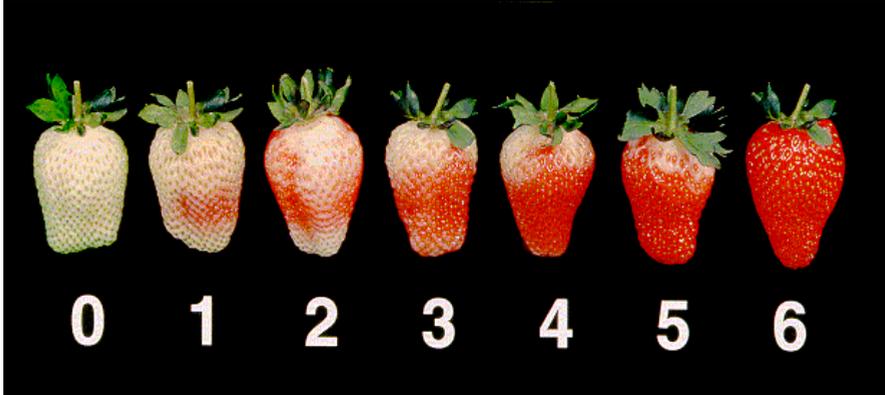


Figura 4-9. "Grado de madurez" de la fresa a través de los colores. NMX-FF-062-SCFI-2002

Tabla 4-1.
Especificaciones de tamaño según diámetro ecuatorial. NMX-FF-062-SCFI-2002

Tamaño	Intervalo del diámetro ecuatorial
A	3.2 - mayor
B	2.6 – 3.1
C	2.0 – 2.6
D	1.6 – 1.9

En el caso del primer criterio, para las fresas de la variedad 'Sweet charlie', se usaron los "grados de madurez" 4, 5 y 6 con el objetivo de evaluar la sensibilidad del dispositivo para medir la impedancia y para las variedades 'Festival' y 'Camino real' se utilizaron los niveles de "grado de madurez" 2, 4 y 6 con el propósito de abarcar la mayoría de los niveles mencionados en la norma. Para el segundo

criterio se usaron, para las tres variedades de fresa, los intervalos de tamaño B y C, debido a que son las que predominan en la región.

Para cada variedad se formaron seis grupos, diferenciados por tres niveles de “grado de madurez” preestablecidos y dos intervalos de tamaño. La nomenclatura propuesta para este trabajo fue utilizando primero el “grado de madurez” seguido del intervalo de tamaño y colocando un subíndice con la letra inicial del nombre de la variedad. Por ejemplo, la nomenclatura 6C_F, indica un grupo con “grado de madurez” 6, tamaño C y variedad ‘Festival’. (Tabla 4-2).

Los frutos, una vez clasificados, fueron colocados en bandejas de cartón con el objetivo de minimizar el daño mecánico y facilitar su transporte y manejo. Las muestras se refrigeraron a una temperatura de 4 °C (39,2 °F) para reducir el calor del fruto y evitar daños como suavizamiento de la piel, haciéndola más susceptible a los daños mecánicos, al oscurecimiento del color y a la pérdida de agua (Alcántara, 2009). Las muestras fueron inmediatamente transportadas al laboratorio del Departamento de Ingeniería Física de la División de Ciencias e Ingeniería del Campus León, donde se realizaron los ensayos de color e impedancia bio-eléctrica. Los ensayos de firmeza se realizaron en el Departamento de Calidad Poscosecha de Alimentos de la División de Ciencias de la Vida del Campus Irapuato – Salamanca. Ambos campi pertenecientes a la Universidad de Guanajuato.

Los frutos se sometieron a los ensayos el mismo día de su recolección. La temperatura ambiente media fue de 19 °C (66,2 °F) con una humedad relativa promedio de 57,7%.

Tabla 4-2.
Características de los grupos definidos para este trabajo de las tres variedades de fresa.

Variedad	"grados de madurez"	Intervalo de tamaño	Número de muestras por grupo	Número total de muestras
'Sweet charlie'	4	B	20	118
	5	B	20	
	6	B	20	
	4	C	19	
	5	C	19	
'Festival'	2	B	25	150
	4	B	25	
	6	B	25	
	2	C	25	
	4	C	25	
'Camino real'	2	B	25	150
	4	B	25	
	6	B	25	
	2	C	25	
	4	C	25	
	6	C	25	

En la Tabla 4-3 se muestra el formato utilizado para el registro de los resultados obtenidos durante los ensayos de la medición de la impedancia bio-eléctrica, del color y la firmeza, realizados a los grupos de fresas definidos con anterioridad.

Tabla 4-3.
Formato para el registro de los resultados obtenidos durante los diferentes ensayos.

GRUPO: _____ Fecha _____
 Grado de madurez: _____
 Tamaño: _____
 Variedad: 'Sweet charlie' 'Festival' 'Camino real'

muestra	peso, g	diámetro ecuatorial, cm		diámetro polar, cm	color					impedancia bioeléctrica				firmeza, N			
		mayor	menor		L*	a*	b*	hab	ΔE^*ab	Rs (Ω)	CPE-T	CPE-P	Rp (Ω)	1ra. medición	2da. medición	promedio	
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	
6																	
7																	
8																	
9																	
10																	
.....																	

4.4.2 Ensayo de la medida no destructiva del color

El espectrofotómetro se calibró de acuerdo al manual de operación del equipo. El rango de longitud de onda registrado fue de 400 a 700 nm, a intervalos de 20 nm. El sistema óptico empleado (geometría) fue del tipo d/0 con componente especular incluido. El rango fotométrico es de 0 % a 175 % de reflectancia.

Las mediciones del color externo se hicieron por triplicado alrededor del diámetro ecuatorial, girando manualmente el fruto asegurando que la medición fuera en puntos equidistantes y registrando el valor promedio de las lecturas generadas por el espectrofotómetro de las variables L^* , a^* y b^* . El fruto fue colocado lo más próximo a la apertura para la medición y se oprimió el botón que hace que el espectrofotómetro haga tres disparos sobre la superficie del fruto mostrando directamente en la pantalla el valor promedio de las tres lecturas.

A partir de las variables de color a^* y b^* se determinaron los valores para h_{ab} (ángulo cromático) el cual es una de las principales propiedades del color, definida técnicamente como el grado en el cual un estímulo puede ser descrito como similar o diferente a los estímulos que son descritos como rojo, amarillo, verde y azul y cuyo valor se obtiene de la siguiente fórmula:

$$h_{ab} = \tan^{-1} \left(b^* / a^* \right), \quad (26)$$

donde:

h = ángulo cuya base es el eje $+a^*$ y se expresa en grados (Figura 4-10). 0° corresponde a $+a^*$ (rojo), 90° a $+b^*$ (amarillo), 180° a $-a^*$ (verde) y 270° a $-b^*$ (azul).

Asimismo se calcularon las diferencias (ΔE^*_{ab}) de sensaciones colorimétricas usando la ecuación 8, mencionada en el Capítulo 2.

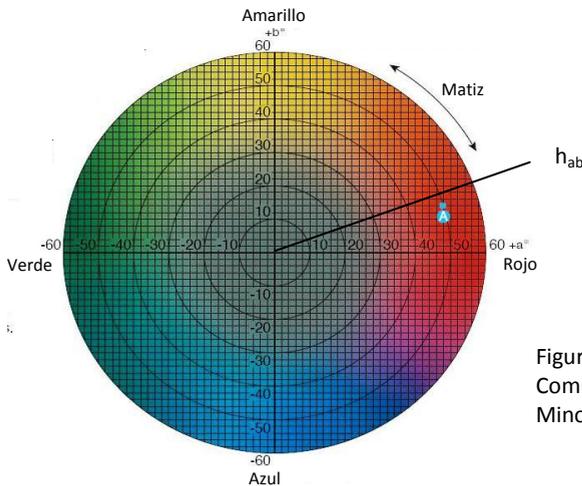


Figura 4-10. Diagrama de cromaticidad. Comunicación Precisa de los Colores Minolta, 2007.

4.4.3 Ensayo de la medida no destructiva de la impedancia bio-eléctrica

Para realizar las mediciones de la impedancia bio-eléctrica las fresas fueron colocadas manualmente en el recipiente de nylacero de manera que su eje de simetría fuera vertical, con el pedúnculo hacia arriba como se muestra en la Figura 4-11. Una vez colocada la muestra las puntas de los electrodos de cobre fueron embebidas con el gel conductor y puestas en contacto con el fruto a nivel de la zona ecuatorial. Las mediciones de impedancia se hicieron por duplicado.

Para controlar las mediciones y procesar los datos se utilizó el programa LabView® distribuido por *Scribner Associates* y el cual, a través del subprograma ZPlot® se ingresan los parámetros definidos para las mediciones de la impedancia.



Figura 4-11. Posición de la fresa durante el ensayo de medición de la impedancia bio - eléctrica.

Este subprograma (Figura 4-12) permite establecer los valores de algunos parámetros como: corriente directa (DC, por sus siglas en inglés), amplitud de la corriente alterna (AC, por sus siglas en inglés), frecuencia de barrido (frecuencia inicial y final), etc. En nuestro caso se trabajó una amplitud para la corriente alterna de 1000 mV con una frecuencia de barrido desde 1 Hz hasta 1 MHz, rango que permite caracterizar las regiones de dispersión α y β de los tejidos (véase 2.3.2).

Una vez colocados los electrodos en la muestra se presiona el icono  localizado en la parte superior de la ventana del ZPlot® (Figura 4-12), iniciando de esta manera la medición de la impedancia del fruto. Durante la prueba el subprograma ZView™; en tiempo real, va mostrando los resultados obtenidos.

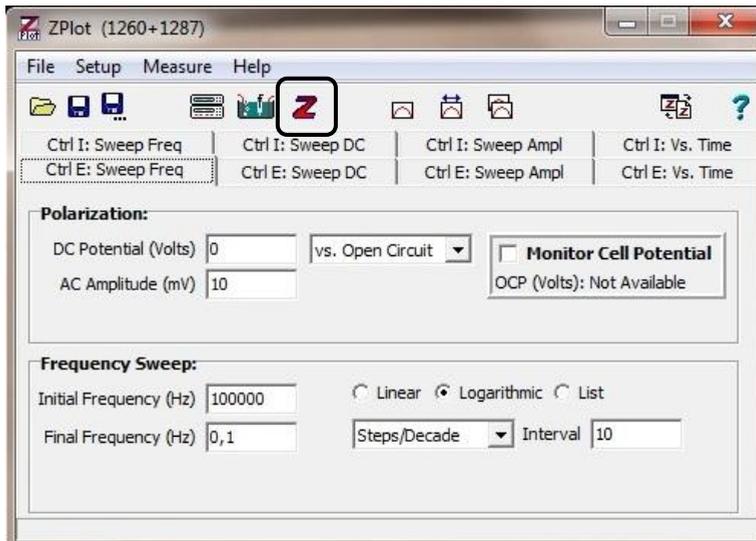


Figura 4-12. Ventana del subprograma Zplot® para el control y análisis de la impedancia. “Scribner Associates, Inc”.

En la Figura 4-13 se muestran las gráficas obtenidas durante los ensayos de medida de la impedancia. De izquierda a derecha, en la primera gráfica (diagrama de Nyquist o Cole-Cole) se muestra el espectro de impedancia característico de la fresa. El eje de las abscisas corresponde a la impedancia real, Z' (resistencia) y el eje de las ordenadas a la impedancia imaginaria, Z'' (reactancia). Como se mencionó la impedancia puede dar información acerca de los procesos electroquímicos que ocurren en los tejidos y puede ser usada para caracterizar el tejido o monitorear los cambios fisiológicos (Freeborn *et al.*, 2013).

Asimismo, se observan los diagramas de Bode para las impedancias (gráficas superior e inferior – derecha). La gráfica superior derecha de la Figura 4-13 corresponde al diagrama de magnitud de Bode el cual representa el módulo de la función de transferencia $|Z|$ y la gráfica inferior corresponde al diagrama de fase

de Bode el cual representa la fase de la función, la cual en sistemas eléctricos debe estar acotada entre -90 y 90° .

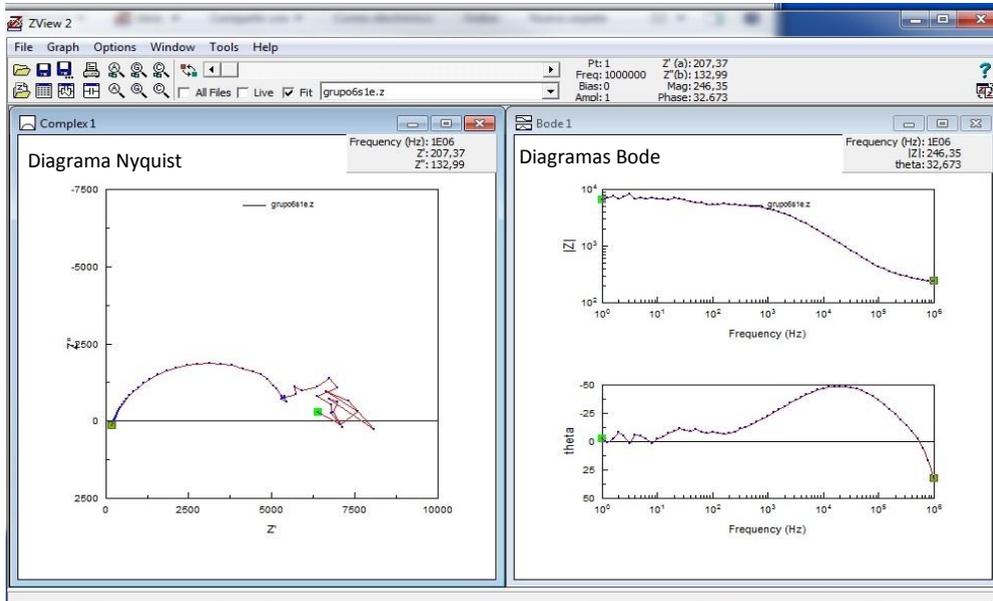


Figura 4-13. Gráficas (Diagramas de Nyquist y Bode) del espectro de impedancia de la fresa.

La impedancia puede ser separada en sus componentes resistivos, inductivos y capacitivos. Para esto se utilizó el circuito equivalente (modelo de impedancia Cole) que se muestra dentro del rectángulo con línea color negro en la Figura 4-14 y en la Figura 4-15. Como se mencionó en el Capítulo 2, este circuito es utilizado en el estudio de tejidos biológicos (Cabrera *et al.*, 2007) y está integrado por un resistor a altas frecuencias R_s , un resistor a bajas frecuencias (R_p) y un elemento de fase constante (CPE). Este modelo es muy popular debido a su simplicidad y al buen ajuste con los datos medidos, mostrando el comportamiento de la impedancia en función de la frecuencia (Freeborn *et al.*, 2013).

El subprograma ZView™ permite, a partir del espectro de impedancia obtenido durante las mediciones (diagrama Nyquist), ajustar de manera manual los puntos obtenidos a un semicírculo que más se asemeje al comportamiento de dichos puntos y así eliminar cualquier depresión en la curva. Seguido a esto se le indica al programa (“Instant Fit”) que calcule los valores para cada uno de los elementos eléctricos que forman el circuito equivalente definido (Figura 4-15).

A menudo el Elemento de Fase Constante es usado en los modelos eléctricos (Figura 4-15), en lugar de un capacitor para compensar la no-homogeneidad de los sistemas. Por ejemplo, una superficie rugosa puede causar una capacitancia de doble capa. Este tipo de circuitos son usados en las áreas de electroquímica (Jesus *et al.* 2008), donde R_s y R_p son las resistencias y la impedancia del CPE es calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$Z_{CPE} = \frac{1}{(j\omega)^{\alpha}C} = \frac{1}{s^{\alpha}C} , \quad (27)$$

Donde C es una capacitancia del orden fraccional y α es un parámetro (coeficiente de dispersión) que puede variar entre 0 y 1, siendo un capacitor ideal cuando $\alpha = 1$.

El elemento de fase constante, es definido por dos valores CPE-T (magnitud) y CPE-P (fase). Si CPE-P es cercano a 1 entonces la ecuación es idéntica a un capacitor y por lo tanto el material tiende a ser homogéneo. Si es igual a 0,5, en lugar del semicírculo de la Figura 4-13 se obtendrá una recta de 45 grados. Cuando CPE es colocado en paralelo a un resistor, se obtiene un elemento Cole - Cole (semicírculo de la Figura 2-19).

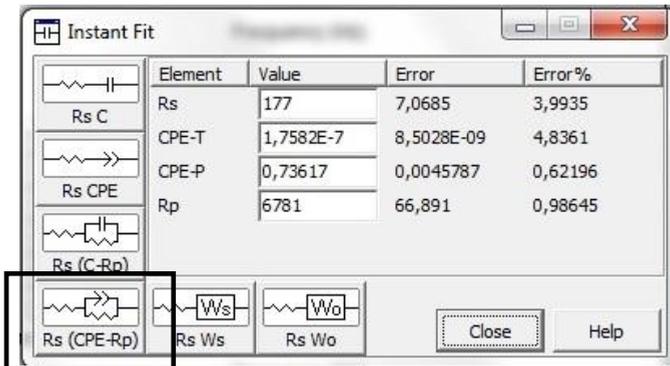


Figura 4-14. Ventana secundaria del subprograma ZView™ con las opciones de los circuitos a aplicar. Scribner Associates, Inc”.

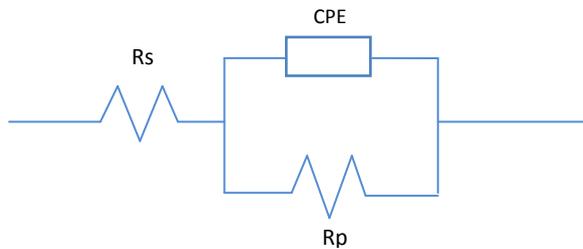


Figura 4-15. Modelo del circuito eléctrico utilizado para medir las impedancias de los componentes eléctricos.

En resumen, los componentes eléctricos como R_s y R_p y los elementos de fase constante (CPE - T y CPE - P) pueden relacionarse con las características físicas de las células y tejidos de los frutos. Por ejemplo, R_s y R_p aportan información acerca de la resistencia intracelular y extracelular, respectivamente (Harker y Maindonald, 1994; Cole, 1972, Grimmes y Grotten, 2000); CPE-T de la estructura de las membranas del tejido y CPE-P del grado de homogeneidad de la muestra, cuando CPE - P es igual a 1 la muestra es homogénea.

4.4.4 Ensayo de la medida destructiva de la firmeza

Como se mencionó la medición de la firmeza se llevó a cabo utilizando un Analizador de Textura (TA-XT2) de la marca Stable Microsystems. Este equipo permite registrar la fuerza máxima de penetración. Pelayo *et al.*, (2005) midieron la firmeza de tres variedades de fresa utilizando una probeta de 3 mm de diámetro. En nuestro caso se seleccionó una probeta cilíndrica de 4 mm de diámetro, a una velocidad de penetración de 1 mm s^{-1} . Dos mediciones se realizaron alrededor del ecuador y en posiciones opuestas a 90° , Figura 4-16.

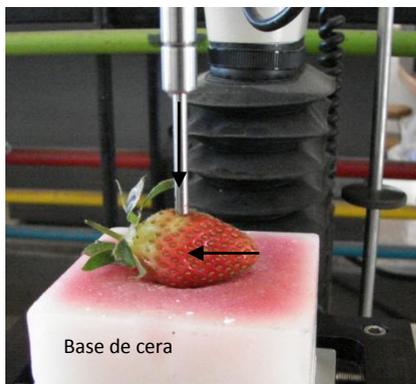


Figura 4-16. Zonas del fruto definidas para medir la firmeza.

El tamaño de la probeta utilizado fue definido en base al principio de geometría semi – infinita (Figura 4-17) la cual asume que la muestra es semi - infinita en tamaño, lo que significa, que la muestra es más grande que la probeta y que los efectos de los bordes y esquinas son insignificantes (Bourne, 2002). El diámetro de la muestra debe ser por lo menos tres veces mayor que el diámetro de la probeta.

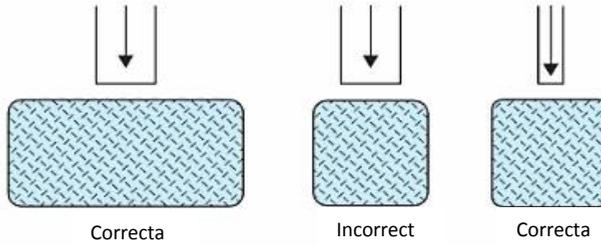


Figura 4-17. Principio de la geometría semi – infinita, Bourne 2002.

Para obtener los valores de firmeza se utilizaron las gráficas de fuerza / distancia obtenidas durante los ensayos. La fuerza máxima se obtuvo tomando el valor del pico más alto. Una curva típica de esta prueba se muestra en la Figura 4-18. En esta gráfica es posible observar que al inicio hay un incremento de la fuerza en muy poca distancia. En esta etapa de la curva el fruto solo se está deformando (cambia la forma de la células y la membrana celular permanece intacta) y aún no hay ruptura del tejido. Esta etapa finaliza cuando la probeta comienza a penetrar cambiando drásticamente la pendiente de la curva, a este punto se le conoce como punto de ruptura y finalmente, la fuerza decrece mostrando a partir de cierta distancia, la resistencia a la penetración de la pulpa del fruto.



Figura 4-18. Gráfica típica de una prueba de fuerza - deformación.

Una base de cera con una concavidad al centro (Figura 4-16) fue construida para colocar la fresa, lo que permitió que el fruto se mantuviera inmóvil durante la prueba.

El procedimiento descrito en este capítulo se repitió para cada una de las tres variedades de fresa, mencionadas anteriormente, asegurando en lo posible que las condiciones como hora de corte y temperatura de almacenamiento, fueran siempre las mismas durante los ensayos.

4.4.5 Pruebas estadísticas empleadas para el análisis de datos

Para el análisis de los resultados se utilizó el programa statgraphics plus 5.1, el cual permite realizar el análisis estadístico y visualizar datos y gráficas. En este trabajo se utilizaron las siguientes pruebas estadísticas: análisis de varianza (simple y factorial), método de la diferencia significativa mínima (LSD) de Fisher, prueba de Tukey, análisis discriminante y la prueba de regresión lineal múltiple (RLM).

CAPÍTULO 5

Resultados y discusión

5.1 Introducción

En la primera parte de este capítulo, y con el objetivo de conocer el grado de homogeneidad de las muestras, se presentan los resultados obtenidos durante la caracterización física, según la norma mexicana NMX-FF-062-SCFI-2002, de los tres lotes de las variedades de fresa ‘Sweet charlie’, ‘Festival’ y ‘Camino real’ utilizados en este trabajo.

Seguidamente, se presenta para cada variedad el análisis estadístico de los resultados obtenidos de las mediciones de color (valores de L^* , a^* y b^* , además de los cálculos del ángulo cromático h_{ab} y de la diferencia de color ΔE^*_{ab}), firmeza destructiva e impedancia bio – eléctrica (valores de R_s , CPE-T, CPE-P y R_p). Así mismo, se analizó el efecto de los factores: “*grado de madurez*”, variedad, y tamaño en cada una de las variables en estudio. En la sección de impedancia se menciona además, las características del dispositivo construido para llevar a cabo las mediciones en la fresa.

Por otro lado, se utilizó la prueba estadística de Análisis Discriminante con la finalidad de clasificar los grupos de “*grado de madurez*” preestablecidos, de acuerdo con las variables de color (L^* , a^* y b^*) e impedancia (R_s , CPE-T, CPE-P y R_p), así como conocer las variables que mejor discriminan a través de las funciones de discriminación.

Y finalmente, se utilizó la prueba estadística de Regresión Lineal Múltiple con el objetivo de conocer la relación entre los valores de la variable de firmeza destructiva con los valores obtenidos de las variables de color e impedancia.

5.2 Resultados de clasificación previa según la norma mexicana

5.2.1 Clasificación previa de la variedad 'Sweet charlie' según la NOM.

En la Tabla 5-1 se muestran los valores de las medias aritméticas (\bar{x}), las desviaciones estándar (σ), y entre paréntesis, los mínimos y máximos, de los valores de diámetro y peso obtenidos durante la prueba ANOVA a partir de los datos de clasificación de la fresa, para cada uno de los grupos definidos en base a su "grado de madurez" (valor numérico 4, 5 y 6) y tamaño (diámetro ecuatorial, letras B y C) indicados ambos en la Norma Mexicana (Figura 4-9 y Tabla 4-1, respectivamente).

Los valores obtenidos de la media aritmética para el diámetro ecuatorial correspondientes a los grupos 6B_s, 5B_s y 4B_s se encuentran dentro del intervalo de tamaño preestablecido B (2,6 – 3,1 cm) mientras que los valores de los grupos 6C_s, 5C_s y 4C_s dentro del intervalo de tamaño preestablecido C (2,0 – 2,6 cm).

Para los grupos 6B_s, 5B_s y 4B_s clasificados dentro del intervalo de tamaño preestablecido B se obtuvieron valores medios del diámetro ecuatorial de 2,80, 2,77 y 2,81 cm, respectivamente. Y para los grupos 6C_s, 5C_s y 4C_s clasificados dentro del intervalo de tamaño preestablecido C, se obtuvieron valores de 2,39, 2,42 y 2,35 cm, respectivamente. En cuanto al peso, variable que no fue controlada al clasificar las muestras, se obtuvieron valores de 10,54, 10,43 y 10,21 g, para los grupos 6B_s, 5B_s y 4B_s, respectivamente y de 6,79, 7,41 y 7,23 g, para 6C_s, 5C_s y 4C_s, respectivamente.

Según la prueba de la diferencia de significación mínima (LSD) y como lo indican las letras en negrillas ubicadas después del valor de la desviación estándar de la Tabla

5-1, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para los valores medios del diámetro ecuatorial y polar y el peso entre los diferentes grupos pertenecientes a los tamaños B y C.

Tabla 5-1.
Resumen estadístico de los valores de diámetro y peso para cada grupo de la variedad ‘Sweet charlie’.

Grupo ¹	Número de muestras	Diámetro (cm) ²		Peso ² (g)
		Ecuatorial	Polar	
6B _S	20	x = 2,80 σ = 0,14 a (2,6 – 3,1)	x = 3,56 σ = 0,33 a (3,1 – 4,1)	x = 10,54 σ = 1,76 a (7,4 – 14,9)
5B _S	20	x = 2,77 σ = 0,16 a (2,6 – 3,1)	x = 3,62 σ = 0,35 a (3,2 – 4,4)	x = 10,43 σ = 1,73 a (7,5 – 13,3)
4B _S	20	x = 2,81 σ = 0,13 a (2,6 – 3,1)	x = 3,58 σ = 0,31 a (2,9 – 4,1)	x = 10,21 σ = 1,59 a (6,2 – 12,6)
6C _S	19	x = 2,39 σ = 0,09 a (2,2 – 2,5)	x = 3,07 σ = 0,37 a (2,5 – 4,0)	x = 6,79 σ = 1,26 a (4,7 – 9,6)
5C _S	19	x = 2,42 σ = 0,13 a (2,2 – 2,6)	x = 3,21 σ = 0,27 a (2,7 – 3,6)	x = 7,41 σ = 1,14 a (5,2 – 9,0)
4C _S	19	x = 2,35 σ = 0,16 a (2,1 – 2,6)	x = 3,23 σ = 0,29 a (2,8 – 4,0)	x = 7,23 σ = 1,03 a (5,2 – 8,9)

¹ El valor numérico indica el nivel de “grado de madurez” y la letra el tamaño según la NOM.

² Valores mínimo y máximo entre paréntesis.

Subíndices con misma letra indica que no hay diferencias significativas entre los grupos.

Asimismo, se llevó a cabo la prueba ANOVA para comprobar que existían diferencias estadísticamente significativas entre los grupos tamaño B con los del C, según las variables de diámetro ecuatorial y polar y peso. La prueba mostró diferencias significativas con un valor de $p < 0,05$ a un nivel de confianza de 95 %. Aunque, como se mencionó, el diámetro polar y el peso fueron variables no controladas, esta misma prueba mostró diferencias estadísticamente significativas entre los dos tamaños. En el Anexo 4, se muestran las gráficas comparativas entre los dos intervalos de tamaño preestablecidos para cada una de las características físicas evaluadas (diámetros ecuatorial y polar, y peso).

5.2.2 Clasificación previa de la variedad 'Festival' según la NOM.

Para los ensayos con las fresas de la variedad 'Festival' los "*grados de madurez*" utilizados fueron 6,4 y 2 y no 6, 5 y 4 como fue en el caso de la variedad 'Sweet charlie'. Como se mencionó, la Norma Oficial Mexicana se tomó como referencia para clasificar en base al "*grado de madurez*", la cual es utilizada para la clasificación subjetiva a través de los colores.

En la Tabla 5-2 se muestran los valores de las medias aritméticas, las desviaciones estándar, y entre paréntesis los mínimos y máximos, de los valores de diámetro y peso obtenidos durante la clasificación de las fresas de la variedad 'Festival'. Como se puede observar, para los valores del diámetro ecuatorial, la prueba LSD muestra que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los grupos 6B_F, 4B_F y 2B_F; así como entre los grupos 6C_F, 4C_F y 2C_F lo que significa que las muestras fueron clasificadas de acuerdo a los intervalos de tamaño preestablecidos B y C, indicados en la norma.

Esto no sucede con los valores de las características físicas de diámetro polar y peso. En el caso de los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño B, se puede observar que para los valores de diámetro polar hay una diferencia estadísticamente significativa entre el grupo 2B_F con los grupos 6B_F y 4B_F y en el caso de los valores de la variable peso, hay una diferencia entre 6B_F y 2B_F, esto puede ser debido a que las fresas del grupo 2 tienen un menor desarrollo.

Para los grupos 6B_F, 4B_F y 2B_F clasificados dentro del intervalo de tamaño B (2,6 – 3,1 cm) se obtuvieron valores medios para el diámetro ecuatorial de 2,72, 2,73 y 2,67 cm, respectivamente. Y para los grupos 6C_F, 4C_F y 2C_F clasificados dentro del intervalo de tamaño C (2,0 – 2,6 cm.) se obtuvieron valores de 2,31, 2,28 y 2,29 cm,

respectivamente. En cuanto al peso se obtuvieron valores de 11,40, 10,73 y 10,01 g, para los grupos 6B_F, 4B_F y 2B_F, respectivamente y de 7,59, 7,45 y 7,05 g, para 6C_F, 4C_F y 2C_F, respectivamente.

Tabla 5-2.
Resumen estadístico de los valores de diámetro y peso para cada grupo de la variedad 'Festival'.

Grupo ¹	Diámetro (cm) ²		Peso ² (g)
	Ecuatorial	Polar	
6B _F	x = 2,72 σ = 0,10 a (2,6 – 2,9)	x = 4,04 σ = 0,37 a (3,2 – 4,65)	x = 11,40 σ = 1,80 a (8,0 – 14,8)
4B _F	x = 2,73 σ = 0,11 a (2,6 – 3,0)	x = 3,91 σ = 0,39 a (3,3 – 4,7)	x = 10,73 σ = 1,71 ab (7,9 – 14,6)
2B _F	x = 2,67 σ = 0,06 a (2,6 – 2,8)	x = 3,60 σ = 0,42 b (2,7 – 4,4)	x = 10,01 σ = 1,53 b (6,7 – 12,6)
6C _F	x = 2,31 σ = 0,13 a (2,1 – 2,6)	x = 3,67 σ = 0,33 a (2,9 – 4,4)	x = 7,59 σ = 1,35 a (5,5 – 10,4)
4C _F	x = 2,28 σ = 0,15 a (2,0 – 2,6)	x = 3,49 σ = 0,41 a (2,4 – 4,1)	x = 7,45 σ = 1,54 a (4,9 – 10,7)
2C _F	x = 2,29 σ = 0,13 a (2,0 – 2,6)	x = 3,47 σ = 0,34 a (2,8 – 4,0)	x = 7,05 σ = 1,15 a (5,1 – 9,0)

¹ El valor numérico indica el nivel de "grado de madurez" y la letra el tamaño según la NOM.

² Valores mínimo y máximo entre paréntesis.

Subíndices con misma letra indica que no hay diferencias significativas entre los grupos.

En el Anexo 5 se muestran la gráficas comparativas entre los grupos de tamaño B y C, así como los valores de *P* para cada una de las características físicas. En el caso de los valores para el diámetro polar, la prueba ANOVA muestra que no hay diferencias estadísticamente significativas ($P > 0,05$) entre los grupos B y C con "grado de madurez" 2 .

5.2.3 Clasificación previa de la variedad 'Camino real' según la NOM.

Para las muestras de la variedad 'Camino real' los valores de las medias aritméticas, las desviaciones estándar, y entre paréntesis los máximos y mínimos obtenidos para cada una de las características físicas, se muestran en la Tabla 5-3.

Como puede observarse, para los grupos con fresas clasificadas dentro del intervalo de tamaño B, la prueba LSD mostró que en el caso de los valores medios del diámetro ecuatorial no hay diferencias estadísticamente significativas, a un nivel de confianza del 95 %, observándose la misma situación para los grupos tamaño C. En el caso del diámetro polar y peso hay una diferencia estadísticamente significativa entre los grupos 4B_{CR} y 2B_{CR}, mientras que en el caso de los grupos pertenecientes al intervalo de tamaño C, para los valores de diámetro polar, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos 6C_{CR} y 4C_{CR}.

Para los grupos 6B_{CR}, 4B_{CR} y 2B_{CR} clasificados dentro del intervalo de tamaño B (2,6 – 3,1 cm) se obtuvieron valores medios de 2,67, 2,70 y 2,71 cm, respectivamente. Y para los grupos 6C_{CR}, 4C_{CR} y 2C_{CR} clasificados dentro del intervalo de tamaño C (2,0 – 2,6 cm) se obtuvieron valores de 2,30, 2,30 y 2,30 cm, respectivamente. En cuanto al peso se obtuvieron valores de 11,60, 11,90 y 10,60 g, para los grupos 6B_{CR}, 4B_{CR} y 2B_{CR}, respectivamente y de 7,50, 8,10 y 7,40 g, para 6C_{CR}, 4C_{CR} y 2C_{CR}, respectivamente.

Tabla 5-3.

Resumen estadístico de los valores de diámetro y peso para cada grupo de la variedad 'Camino real'.

Grupo ¹	Diámetro (cm) ²		Peso ² (g)
	Ecuatorial	Polar	
6B _{CR}	x = 2,67 σ = 0,11 a (2,5 – 3,0)	x = 4,20 σ = 0,38 ab (3,5 – 4,9)	x = 11,60 σ = 1,80 ab (8,1 – 15,0)
4B _{CR}	x = 2,70 σ = 0,19 a (2,3 – 3,0)	x = 4,30 σ = 0,33 a (3,4 – 4,8)	x = 11,90 σ = 2,2 a (7,9 – 15,7)
2B _{CR}	x = 2,71 σ = 0,26 a (2,0 – 3,6)	x = 4,10 σ = 0,35 b (3,5 – 4,9)	x = 10,60 σ = 2,20 b (7,8 – 17,4)
6C _{CR}	x = 2,30 σ = 0,18 a (2,0 – 2,6)	x = 3,60 σ = 0,32 a (3,1 – 4,2)	x = 7,50 σ = 1,40 a (5,2 – 9,4)
4C _{CR}	x = 2,30 σ = 0,14 a (2,0 – 2,5)	x = 3,80 σ = 0,37 b (3,1 – 4,6)	x = 8,10 σ = 1,6 a (5,3 – 11,2)
2C _{CR}	x = 2,30 σ = 0,14 a (2,1 – 2,5)	x = 3,70 σ = 0,30 ab (3,0 – 4,2)	x = 7,40 σ = 1,20 a (5,6 – 9,9)

¹ El valor numérico indica el nivel de "grado de madurez" y la letra el tamaño según la NOM.

² Valores mínimo y máximo entre paréntesis.

Subíndices con misma letra indica que no hay diferencias significativas entre los grupos.

En el Anexo 6 se muestran las gráficas comparativas entre los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño B y los de C. Como se podrá observar y por los valores de P obtenidos, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los valores de los diámetros ecuatorial y polar y peso.

En la Figura 5-1 se muestran dentro de las barras, los valores medios del diámetro ecuatorial, así como la desviación estándar (s) para cada una de las tres variedades de fresa, clasificadas dentro del intervalo de tamaño B, para los diferentes “*grados de madurez*”. Se puede observar que las fresas de la variedad ‘Sweet charlie’ son las que tienen un mayor diámetro ecuatorial mientras que las de menor fueron las de ‘Camino real’, a excepción de los grupos clasificados con un “*grado de madurez*” 2 donde las fresas de la variedad ‘Festival’ tiene un diámetro ecuatorial menor.

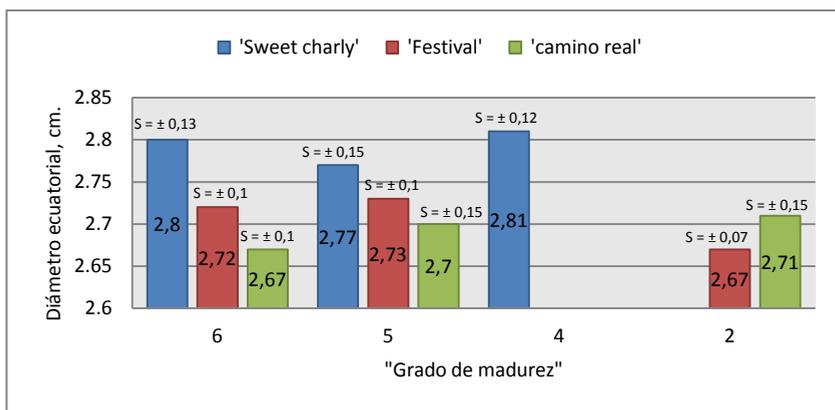


Figura 5-1. Gráfica comparativa entre los valores medios del diámetro ecuatorial para las tres variedades de fresa, tamaño B, en los diferentes “*grados de madurez*”.

En el caso de las fresas clasificadas en el intervalo de tamaño C, Figura 5-2, se puede observar que la variedad ‘Sweet charlie’ sigue siendo la que presenta un diámetro ecuatorial mayor. En este caso los valores para las variedades ‘Festival’ y ‘Camino real’ son casi similares.

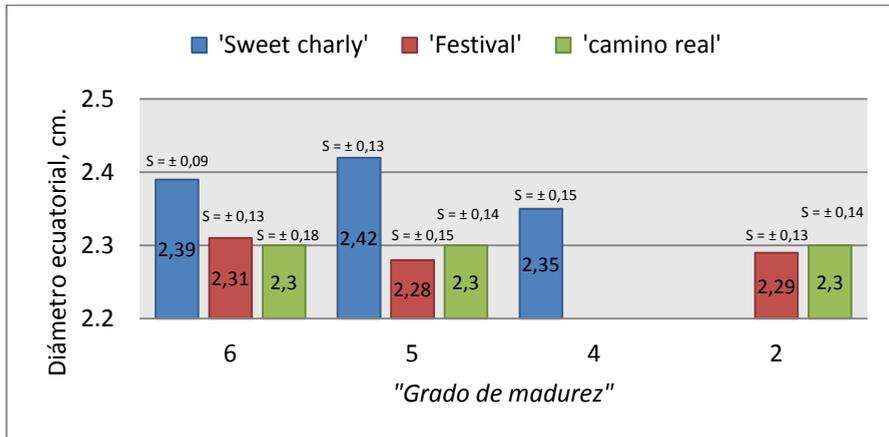


Figura 5-2. Gráficas comparativas entre los valores medios del diámetro ecuatorial para las tres variedades de fresa, tamaño C, en los diferentes "grados de madurez".

En las Figuras 5-3 y 5-4 se puede observar que las fresas con los valores más altos para la variable diámetro polar, son las pertenecientes a la variedad 'Camino real' mientras que las más pequeñas son las 'Sweet charlie', éstas últimas como se observó fueron las de mayor diámetro ecuatorial.

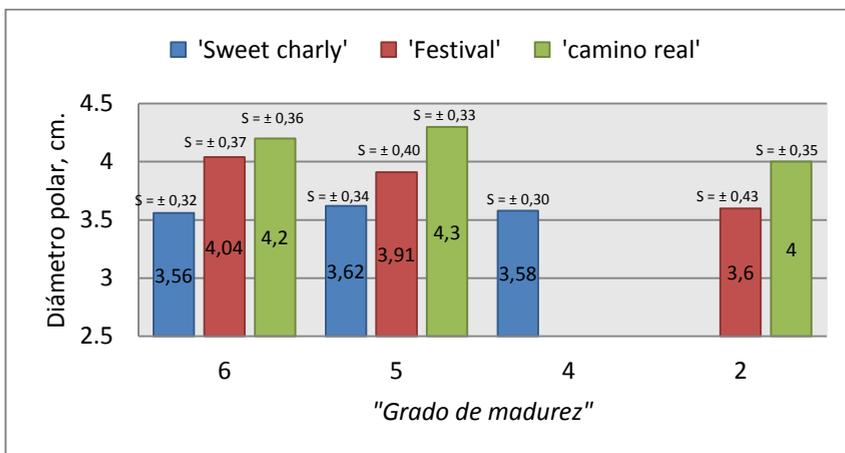


Figura 5-3. Gráficas comparativas entre los valores medios del diámetro polar para las tres variedades de fresa, tamaño B, en los diferentes "grados de madurez".

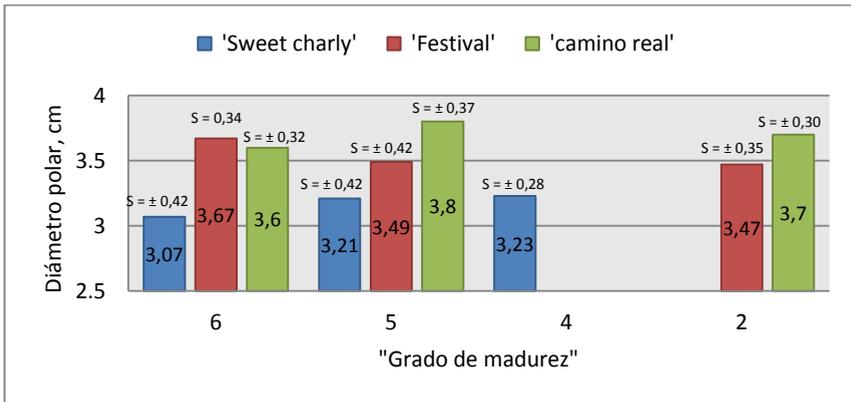


Figura 5-4. Gráficas comparativas entre los valores medios del diámetro polar para las tres variedades de fresa, tamaño C, en los diferentes “grados de madurez”.

Y finalmente, para el caso de la característica física de peso, variable no controlada, la variedad ‘Camino real’ presentó, en la mayoría de los casos, los valores más altos tanto en el intervalo de tamaño B como en el C, Figuras 5-5 y 5-6. Mientras que las fresas de la variedad ‘Sweet charlie’ son las que presentaron un menor peso. Asimismo, de manera general se puede observar que las fresas más pequeñas son las de menor “grado de madurez”.

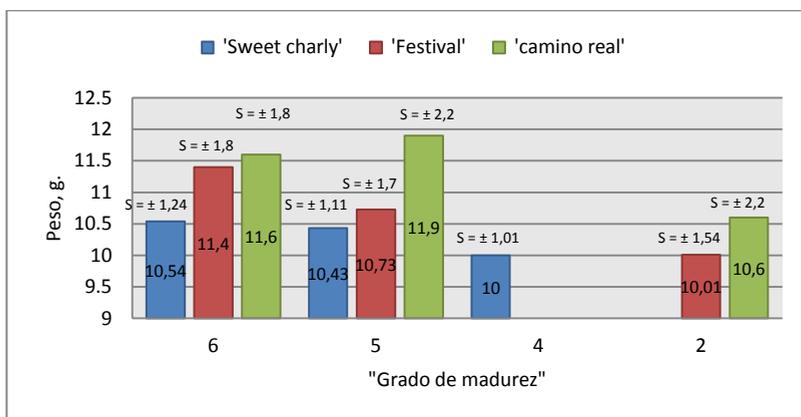


Figura 5-5. Gráficas comparativas entre los valores medios del peso para las tres variedades de fresa, tamaño B, en los diferentes “grados de madurez”.

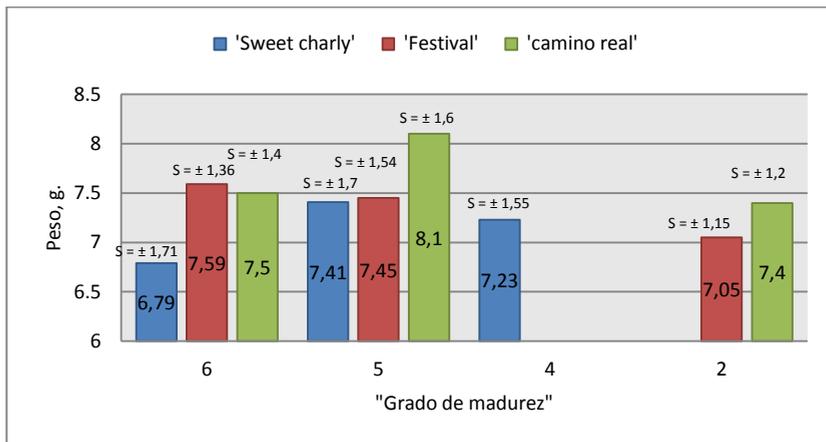
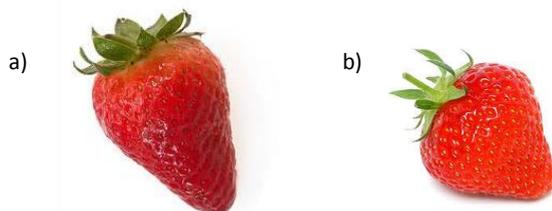


Figura 5-6. Gráficas comparativas entre los valores medios del peso para las tres variedades de fresa, tamaño C, en los diferentes "grados de madurez".

En relación a las variables de diámetro y peso podemos concluir que las fresas más grandes en cuanto a diámetro polar y peso son las que pertenecen a la variedad 'Camino real' ligeramente similares a las fresas de la variedad 'Festival'. Mientras que las fresas de la variedad 'Sweet charlie' son más grandes en cuanto a diámetro ecuatorial. Estas diferencias físicas dependen completamente del tipo de variedad, y su óptimo desarrollo depende de factores como: exposición al sol, disponibilidad, de nutrientes, ubicación del fruto con respecto a la planta, temperatura y momento de la cosecha con respecto al ciclo productivo de la planta. En la siguiente Figura se muestra, a manera de ejemplo, la forma típica de las variedades de fresa utilizadas en este trabajo: a) cónica alargada y b) cónica. En la Figura 2-2, se muestran las diferentes formas de las fresas según la Foundation Plant Service". Universidad de California.

Figura 5-7. Forma típica de las tres variedades de fresa usadas en este trabajo. a) Variedades 'Festival' y 'Camino real', b) variedad 'Sweet charlie'.



Por otro lado, el uso de la Tabla de color de los “*grados de maduración*” de la fresa propuesta por la norma NMX-FF-062-SCFI-2002 (Figura 4-9) y utilizada en este trabajo para clasificar de acuerdo al “*grado de madurez*”, se limita a ser sólo material de apoyo ya que, además de ser una clasificación subjetiva, la intensidad y uniformidad en la distribución del color no sólo depende de la calidad de la ilustración sino del tipo de variedad, concentración de antocianinas, densidad de aqenios, de la ubicación del fruto con respecto a la planta y de la cara del fruto que tuvo una mayor exposición al sol.

5.3 Resultados del ensayo de la medida no destructiva del color

5.3.1 El color según el “*grado de madurez*” y la variedad

El análisis de varianza de los efectos de los factores: “*grado de madurez*”, variedad, (4 y 6) y tamaño (categorías B y C) en la variable de color L*, mostró el efecto altamente significativo de los factores variedad y “*grado de madurez*”, así como de la interacción de ambos, Figura 5-8.

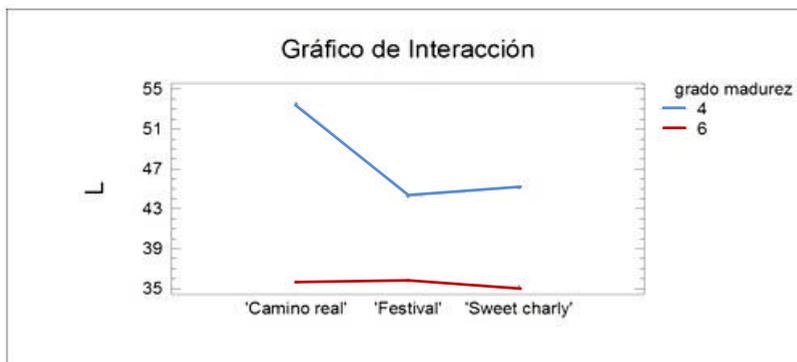


Figura 5-8. Gráfico de interacción, valor de L según las variedades y los valores de “*grado de madurez*”.

Las fresas clasificadas con “*grado de madurez*” 4 tenían un valor de luminosidad significativamente mayor que las clasificadas con “*grado de madurez*” 6.

El factor categoría de tamaño no afectó de forma significativa a la variabilidad de la coordenada L*. La variedad 'Camino real' presentó un valor de luminosidad significativamente mayor que las otras dos variedades, Figura 5-9.

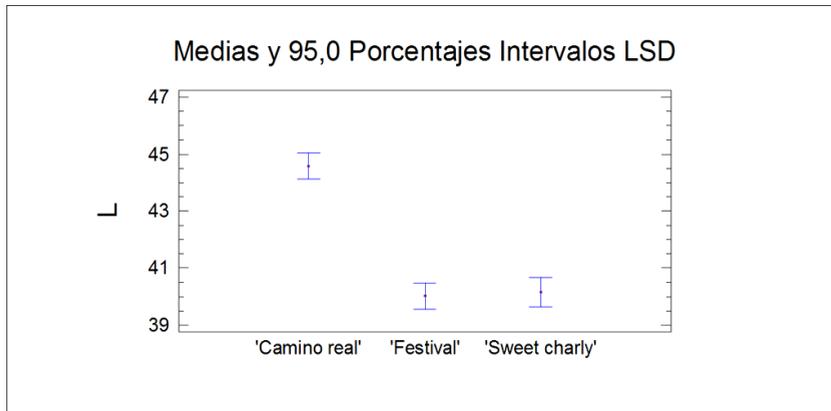


Figura 5-9. Medias e intervalos LSD (95%) de la coordenada de color L para las distintas variedades.

El análisis de varianza de los efectos de los factores, variedad, "grado de madurez" (4 y 6) y tamaño (categorías B y C) en la variable de color a*, mostró el efecto altamente significativo del factor variedad, así como de las interacciones de variedad con "grado de madurez" y de variedad con tamaño. Los factores "grado de madurez" y tamaño no afectaron de forma significativa a la variabilidad de la coordenada L*. La variedad con mayor nivel de rojo (mayor valor de la coordenada de color a*) fue 'Camino real', seguida de 'Festival' y por último 'Sweet charlie', presentando las tres variedades valores significativamente diferentes para un intervalo de confianza del 95%.

El análisis de varianza de los efectos de los factores, variedad, "grado de madurez" (4 y 6) y tamaño (categorías B y C) en la variable de color b*, mostró el efecto

altamente significativo del factor variedad y “*grado de madurez*”, así como de la interacción de ambos. La variedad con mayor nivel de amarillo (mayor valor de la coordenada de color b^*) fue ‘Camino real’, seguida de ‘Festival’ y por último ‘Sweet charlie’, presentando las tres variedades valores significativamente diferentes para un intervalo de confianza del 95%.

5.3.2 Resultados de la medición de color para la variedad ‘Sweet charlie’

En la Tabla 5-4 se muestran los datos de los valores de las medias aritméticas, las desviaciones estándar, y entre paréntesis los mínimos y máximos de las variables L^* , a^* , b^* y del ángulo de tono métrico h_{ab} , obtenidos durante las mediciones no destructivas del color realizadas a las fresas de la variedad ‘Sweet charlie’.

La prueba ANOVA muestra con respecto a la variable L^* que entre los grupos $6B_s$, $5B_s$ y $4B_s$, hay diferencia estadísticamente significativa con un valor de $P < 0,05$ para un intervalo de confianza del 95%, en función del factor “*grado de madurez*” preestablecido. Este mismo resultado se observa en los grupos pertenecientes al intervalo de tamaño C. Para determinar las medias que son significativamente diferentes unas de otras se realizó la prueba de LSD (véase Anexos 7 y 8).

Este hecho, demuestra una relación entre la variable de color L^* con el “*grado de madurez*” preestablecido. También se puede observar que los valores de L^* disminuyen conforme aumenta el “*grado de madurez*” de las fresas, ésto debido al oscurecimiento de la piel del fruto consecuencia del pardeamiento superficial oxidativo y a la pérdida de humedad, lo que resulta en valores de L^* más cercanos a 0, indicando que la reflexión de la luz en la superficie de la fresa es menor. Para los grupos $6B_s$, $5B_s$ y $4B_s$ se obtuvieron valores de 34,80, 39,50 y 44,10, respectivamente y para $6C_s$, $5C_s$ y $4C_s$ de 35,60, 40,80 y 46,10, respectivamente.

En el caso de la variable a^* , se encontraron diferencias estadísticamente significativas (valor de $P < 0,05$) entre los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño B. Mientras que en los grupos pertenecientes al tamaño C se observa una diferencia entre el grupo $4C_s$ con los grupos $5C_s$ y $6C_s$. En el caso de los valores medios de la variable b^* la prueba LSD muestra una diferencia estadísticamente significativa entre el grupo $6B_s$ con los grupos $5B_s$ y $4B_s$, así como entre el grupo $6C_s$ con los grupos $5C_s$ y $4C_s$, ambos con un valor de $P < 0,05$.

Los valores de la coordenada de cromaticidad a^* y b^* , que en ambos casos son positivos, indican que hay una tendencia a los colores rojo y amarillo, respectivamente. Estas variables se deben estudiar en conjunto y no por separado ya que el color es cuantificado por los valores de las coordenadas L^* a^* y b^* y las cuales son representadas en el espacio tridimensional.

Tabla 5-4.

Valores promedio de las variables L^* , a^* , b^* y h_{ab} para fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaños B y C.

Grupo ¹	Variables de color ²			
	L^*	a^*	b^*	h_{ab} (grados)
$6B_s$	$x = 34,80$ $\sigma = 2,57$ a (31,50 – 41,60)	$x = 40,80$ $\sigma = 2,23$ a (36,50 – 45,10)	$x = 25,30$ $\sigma = 3,10$ a (19,40 – 32,80)	$x = 31,79$ $\sigma = 2,76$ a (27,80 – 38,18)
$5B_s$	$x = 39,50$ $\sigma = 4,00$ b (33,10 – 49,20)	$x = 37,00$ $\sigma = 3,35$ b (29,00 – 40,30)	$x = 27,20$ $\sigma = 2,04$ b (23,10 – 30,80)	$x = 36,12$ $\sigma = 3,70$ b (30,08 – 44,79)
$4B_s$	$x = 44,10$ $\sigma = 4,19$ c (37,50 – 49,10)	$x = 34,30$ $\sigma = 5,30$ c (25,80 – 43,30)	$x = 27,90$ $\sigma = 2,40$ b (23,00 – 31,80)	$x = 39,11$ $\sigma = 4,29$ c (31,86 – 46,62)
$6C_s$	$x = 35,60$ $\sigma = 3,15$ a (27,80 – 41,50)	$x = 40,40$ $\sigma = 3,49$ a (30,90 – 44,20)	$x = 25,30$ $\sigma = 4,16$ a (13,20 – 32,20)	$x = 31,79$ $\sigma = 2,95$ a (23,14 – 36,15)
$5C_s$	$x = 40,80$ $\sigma = 4,81$ b (34,20 – 50,30)	$x = 38,90$ $\sigma = 3,32$ a (32,80 – 44,00)	$x = 28,60$ $\sigma = 2,68$ b (24,10 – 34,20)	$x = 36,33$ $\sigma = 3,50$ b (30,54 – 42,60)
$4C_s$	$x = 46,10$ $\sigma = 4,72$ c (39,20 – 53,00)	$x = 30,10$ $\sigma = 6,15$ b (20,90 – 38,50)	$x = 27,50$ $\sigma = 2,04$ b (24,30 – 32,20)	$x = 42,98$ $\sigma = 6,61$ c (33,78 – 55,09)

¹ El valor numérico indica el nivel de “grado de madurez” y la letra el tamaño según la NOM.

² Valores mínimo y máximo entre paréntesis.

Subíndices con misma letra indica que no hay diferencias significativas entre los grupos.

Los valores de la variable h_{ab} (ángulo de tono métrico) mostrados en la Tabla 5-4 disminuyen conforme aumenta el “grado de madurez” del fruto. El análisis LSD, muestra que hay diferencias estadísticamente significativas entre los grupos pertenecientes tanto al intervalo de tamaño B como del C. Para $6B_s$, $5B_s$ y $4B_s$ se obtuvieron valores de 31,79, 36,12 y 39,11, respectivamente y para $6C_s$, $5C_s$ y $4C_s$ valores de 31,79, 36,33 y 42,98, respectivamente. En este caso, h_{ab} disminuye lo que indica que el color superficial del fruto tiende al rojo conforme este va madurando. (véase diagrama de cromaticidad, Figura 4-10)

En la Figura 5-10 se muestran los gráficos de medias de los valores, para cada una de las variables de color L^* , a^* , b^* y h_{ab} , pertenecientes a los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño B, para los tres “grados de madurez”. Como se mencionó, y se puede observar en las Figuras, los valores medios de L^* , b^* y h_{ab} tienden a disminuir mientras que los valores de la coordenada cromática a^* tienden a aumentar.

La disminución de los valores de la luminosidad (L^*) conforme aumenta el “grado de madurez” para las fresas tamaño B fue del 21 % y para el ángulo cromático del 19 % y para las fresas tamaño C, fue del 23 % y 27 %, respectivamente. En las gráficas se muestran los valores de P para un nivel de confianza del 95 %.

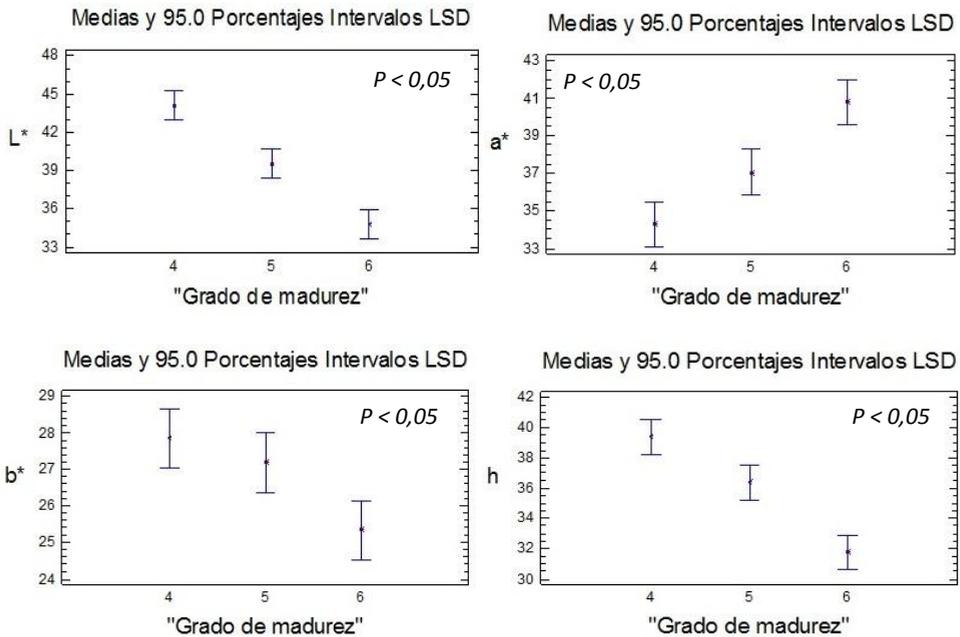


Figura 5-10. Comportamiento de las variables de color para las fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaño B, en los tres niveles de “grado de madurez” predeterminado.

Al igual que en los grupos tamaño B, en la Figura 5-11 se muestra, a través de las gráficas de medias, el comportamiento de los valores de las variables de color para los grupos tamaño C en los niveles de “grado de madurez” predeterminados 4, 5 y 6. Como se mencionó, la luminosidad y el ángulo de tono métrico tienden a disminuir conforme aumenta el “grado de madurez”.

En el caso de la variable cromática a^* , al igual que para las fresas tamaño B, los valores tienden a aumentar siendo más evidente esta tendencia del nivel de “grado de madurez” 4 al 5. La disminución de los valores de L^* y h_{ab} fueron de 23 % y 27 %, respectivamente, siendo mayor que los presentados en los grupos con intervalo de tamaño B.

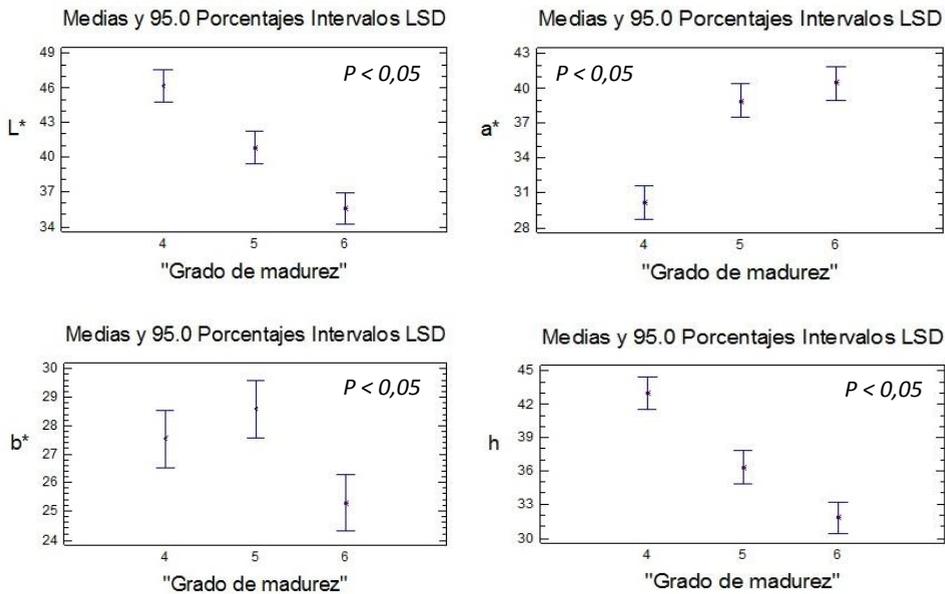


Figura 5-11. Comportamiento de las variables de color para las fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaño C, en los tres niveles de "grado de madurez" predeterminado.

En el caso de la variable b^* , se observa un aumento del nivel 4 de "grado de madurez" al 5 para después presentar un descenso en el nivel 6. Posiblemente el comportamiento de dicha variable se deba al factor humano (clasificación subjetiva) para la clasificación de los grupos en los estadíos 4, 5 y 6 y a la poca diferencia en el color entre los estadíos 4 y 5 mostrados en la Figura 4-9. En el Anexo 13, se muestra el diagrama de dispersión de los puntos obtenidos a partir de los valores de las variables de color para los grupos de la variedad 'Sweet charlie', tamaño B y C.

Como se mencionó en el Capítulo 2, es posible medir las diferencias colorimétricas entre dos muestras. Una de las variables que mejor indica la variación de color es la diferencia de color ΔE^*_{ab} (véase ecuación 8), ya que refleja el cambio total en L^* , a^*

y b^* entre dos grupos, en este caso, entre los clasificados de acuerdo a su “*grados de madurez*”.

En la Tabla 5-5 se muestran los valores de ΔE^*_{ab} obtenidos al comparar los diferentes “*grados de madurez*” de las fresas de la variedad ‘Sweet charlie’ para cada uno de los intervalos de tamaño.

Tabla 5-5.
Valores de ΔE^*_{ab} entre los grupos de las fresas variedad ‘Sweet charlie’, tamaños B y C.

“ <i>Grados de madurez</i> ”	ΔE^*_{ab}	
	Tamaño B	Tamaño C
6-5	7,13	5,61
5-4	5,97	13,52

Como se puede observar en la Tabla 5-5, los grupos que presentan una mayor diferencia son los pertenecientes a los “*grados de madurez*” 5 y 4 clasificados en el intervalo de tamaño C, con un valor de $\Delta E^*_{ab} = 13,52$. Según el estándar ISO 12647-2: 2004, el cual establece unas especificaciones técnicas y una rango de tolerancias que permite la obtención de un mismo resultado de color con independencia de quien lo genere, valores superiores a 5 se considera una diferencia significativa, por lo que en general los valores de ΔE^*_{ab} de la Tabla 5-5 muestran que existe una diferencia de color entre los diferentes grupos clasificados en los niveles de “*grado de madurez*” 4, 5 y 6.

Como se mencionó las variables de color L^* , a^* y b^* aportan información acerca del aspecto externo de los frutos, el cual está directamente relacionado con la apreciación subjetiva de color que se utiliza para determinar el grado de madurez por lo que su medición ha sido útil para discriminar entre frutos con diferente

estadio. Estas variables por sí solas no proporcionan información sobre el color del fruto, es necesario considerar de manera conjunta los valores de L^* , a^* y b^* para medir el color externo de la muestra.

En base a esto, se llevó a cabo la segregación de los frutos en los tres “*grados de madurez*” utilizando los valores de las variables de color L^* , a^* y b^* usando para ello la prueba estadística de análisis discriminante, cuya finalidad es analizar la posible clasificación de los individuos en unos grupos predefinidos de acuerdo con las variables en estudio. Es decir, se trata de confirmar que la clasificación establecida mediante la medida de color de forma subjetiva, corresponde con una medida instrumental y objetiva del color. El ángulo de tono métrico (h_{ab}) no se considera en este análisis debido a que es un valor angular y no lineal como lo son L^* , a^* y b^* .

En la Tabla 5-6 se muestran los resultados del análisis discriminante de los “*grados de madurez*” según las variables de color de 60 fresas de la variedad ‘Sweet charlie’ pertenecientes a los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño B. Como se observa el 70 % (42 fresas) fueron clasificados correctamente. Para las fresas con “*grado de madurez*” 6, el 90 % de 20 frutos, fueron correctamente clasificadas en dicho estadio, mientras que para los “*grados de madurez*” 5 y 4 fue del 55 y 65 %, respectivamente. A partir de la primera función de discriminación estandarizada se puede determinar cual de las tres variables de color (L^* , a^* y b^*) contribuye significativamente al momento de discriminar.

La ecuación 28 de la primera función discriminante estandarizada, con un valor de $P < 0,05$ es estadísticamente significativa al 95 % de nivel de confianza.

$$-1,01465(L^*) + 0,156934(a^*) + 0,201967(b^*) \quad (28)$$

De la magnitud relativa de los coeficientes en la ecuación anterior puede determinarse como se están utilizando las variables independientes para diferenciar entre los grupos. En este caso la variable determinante es L^* .

Tabla 5-6.
 Resultados del análisis discriminante de los “*grados de madurez*” según las variables de color para fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaño B.

Grado de madurez	Número de muestras	Pronosticados “ <i>grado de madurez</i> ”		
		Porcentaje de casos correctamente clasificados: 70,00 %		
		4	5	6
4	20	13 (65,00 %)	7 (35,00 %)	0 (0,00 %)
5	20	4 (20,00 %)	11 (55,00 %)	5 (25,00 %)
6	20	0 (0,00 %)	2 (10,00 %)	18 (90,00 %)

Las funciones utilizadas para clasificar las observaciones en cada uno de los 3 niveles de “*grado de madurez*” predeterminado se muestran en la Tabla 5-7. Estas funciones se usan para medir teóricamente el nivel de “*grado de madurez*” al que pertenecen las nuevas observaciones.

Tabla 5-7.
 Funciones de clasificación para cada uno de los tres “*grados de madurez*” utilizando las variables de color de fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaño B.

“ <i>Grado de madurez</i> ”	Función de clasificación
4	$-229,391 + 8,59953(L^*) + 6,67253(a^*) - 5,43591(b^*)$
5	$-213,142 + 8,02413(L^*) + 6,55826(a^*) - 5,00389(b^*)$
6	$-210,034 + 7,86508(L^*) + 6,78116(a^*) - 5,22746(b^*)$

En el caso de las fresas pertenecientes al intervalo de tamaño C, el 63,79 % de 58 muestras, fueron clasificadas correctamente. En la Tabla 5-8 podemos observar que para los “grados de madurez” 6, 5 y 4 fueron correctamente clasificadas el 75, 52,63 y 63,16 % del total de las fresas para cada grupo en estudio. Al igual que en las fresas tamaño B la variable determinante en la discriminación, según la primera función discriminante, es L^* .

La ecuación 29 de la primera función discriminante con un valor de $P < 0,05$ es estadísticamente significativa al 95 % de nivel de confianza.

$$-0,652317(L^*) + 0,562781(a^*) + 0,0544481(b^*) \quad (29)$$

Tabla 5-8.
 Resultados del análisis discriminante de los “grados de madurez” según las variables de color para fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaño C.

Grado de madurez	Número de muestras	Pronosticados “grado de madurez”		
		Porcentaje de casos correctamente clasificados: 63,79 %		
		4	5	6
4	19	12 (63,16 %)	6 (31,58 %)	1 (5,26 %)
5	19	3 (15,79 %)	10 (52,63 %)	6 (31,58 %)
6	20	0 (0,00 %)	5 (25,00 %)	15 (75,00 %)

Las funciones utilizadas para clasificar de manera teórica las observaciones en cada uno de los tres niveles de “grado de madurez” se muestran en la Tabla 5-9.

Tabla 5-9.
 Funciones de clasificación para cada uno de los tres “grados de madurez” utilizando las variables de color de fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaño C.

“Grado de madurez”	Función de clasificación
4	$-163,145 + 6,76807(L^*) + 4,93069(a^*) - 4,96635(b^*)$
5	$-167,408 + 6,49052(L^*) + 5,21931(a^*) - 4,7396(b^*)$
6	$-157,517 + 6,3274(L^*) + 5,27792(a^*) - 4,96186(b^*)$

5.3.3 Resultados de la medición de color para la variedad 'Festival'

Los valores medios: de las medias aritméticas; las desviaciones estandar; y entre paréntesis los máximos y mínimos de las variables de color L^* , a^* , b^* y h_{ab} obtenidos durante las mediciones del color a las fresas de la variedad 'Festival' clasificadas en base a los intervalos de tamaño B y C para cada uno de los tres "grados de madurez" preestablecidos (2, 4 y 6), se muestran en la Tabla 5-10. Como se ha venido mencionando las variables de color L^* , a^* y b^* aportan información acerca del aspecto externo de los frutos el cual está directamente relacionado con la apreciación subjetiva de color que se utiliza para determinar el grado de madurez por lo que su medición es útil para discriminar entre frutos con diferente estado.

En el caso de las variables L^* y b^* la prueba LSD muestra que los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño B tienen un valor de $P < 0,05$ por lo que hay una diferencia estadísticamente significativa para un intervalo de confianza del 95 %. En el caso de los grupos clasificados dentro del intervalo C, para estas mismas variables, se encontró una diferencia estadística significativa entre el grupo $6C_F$, con los grupos $4C_F$ y $2C_F$.

Para los grupos $6B_F$, $4B_F$ y $2B_F$ se obtuvieron valores de L^* de 36,04, 43,91 y 51,91 mientras que para $6C_F$, $4C_F$ y $2C_F$ de 35,42, 44,36 y 45,27. Lo que muestra que conforme madura el fruto los valores de esta variable descienden. Este mismo comportamiento se observó en las fresas de la variedad 'Sweet charlie'.

Para la variable a^* , se observa que tanto los grupos clasificados en el tamaño B como los del C, los resultados del análisis LSD muestran que son estadísticamente diferentes para un valor de $P < 0,05$ para un nivel de confianza del 95,0 %,

obteniendo para $6B_F$, $4B_F$ y $2B_F$ valores de a^* de 46,32, 42,34 y 38,75, respectivamente; y para $6C_F$, $4C_F$ y $2C_F$ valores de 44,29, 42,44 y 38,63, respectivamente.

Como se puede observar los valores de esta variable son positivos y al igual que la variedad 'Sweet charlie' el comportamiento es ascendente, los valores de a^* para esta variedad aumentan conforme madura el fruto, lo que indica que las fresas de la variedad 'Sweet charlie' y de la variedad 'Festival', aumentan su color rojo conforme maduran.

Los valores del ángulo cromático (h_{ab}) muestran una diferencia estadísticamente significativa entre el "grado de madurez" 6 con 4 y 2, tanto para los grupos tamaño B como C, y al igual que en 'Sweet charlie' éstos tienden a disminuir. En este caso los valores de h_{ab} están cercanos a los 45° por lo que la dirección del tono se ubica en el espacio CIELab entre el amarillo y el rojo (Figura 4-10).

La disminución de los valores de la luminosidad conforme aumenta el "grado de madurez" para las fresas tamaño B fue del 30,57 % y para el ángulo cromático del 4,79 % y para el tamaño C fue de 21 % y 1,0 %, respectivamente. La disminución de h_{ab} en comparación con los porcentajes obtenidos para la variedad 'Sweet charlie' fueron menores.

Tabla 5-10. Valores medios de las variables L*, a*, b* y h_{ab} para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C.

Grupo ¹	Variables de color ²			
	L*	a*	b*	h _{ab} (grados)
6B _F	x = 36,04 σ = 1,92 a (30,50 – 38,90)	x = 46,32 σ = 0,92 c (44,80 – 47,20)	x = 36,28 σ = 1,31 a (33,80 – 38,40)	x = 43,11 σ = 0,47 a (42,14 – 43,79)
4B _F	x = 43,91 σ = 2,87 b (38,80 – 49,60)	x = 42,34 σ = 1,23 b (40,10 – 44,50)	x = 42,65 σ = 2,42 b (38,60 – 46,90)	x = 45,21 σ = 0,81 b (43,86 – 46,5)
2B _F	x = 51,91 σ = 5,77 c (40,90 – 59,90)	x = 38,75 σ = 0,79 a (37,10 – 40,00)	x = 47,31 σ = 0,99 c (46,50 – 49,00)	x = 45,28 σ = 0,98 b (43,26 – 47,05)
6C _F	x = 35,42 σ = 2,73 a (29,70 – 42,30)	x = 44,29 σ = 1,10 c (41,80 – 46,10)	x = 36,20 σ = 1,88 a (32,50 – 40,00)	x = 43,14 σ = 0,61 a (41,97 – 44,24)
4C _F	x = 44,36 σ = 3,43 b (37,30 – 49,60)	x = 42,44 σ = 1,43 b (39,50 – 44,70)	x = 42,74 σ = 2,82 b (37,50 – 47,90)	x = 45,20 σ = 0,94 b (43,51 – 47,02)
2C _F	x = 45,27 σ = 5,93 b (32,90 – 57,80)	x = 38,63 σ = 1,19 a (36,10 – 41,10)	x = 43,90 σ = 2,71 b (38,00 – 49,10)	x = 44,74 σ = 1,22 b (41,82 – 46,86)

¹ El valor numérico indica el nivel de "grado de madurez" y la letra el tamaño según la NOM.

² Valores mínimo y máximo entre paréntesis.

Subíndices con misma letra indica que no hay diferencias significativas entre los grupos.

En la Figura 5-12 se muestran los gráficos de medias de los valores mostrados en la Tabla 5-10, para fresas de la variedad 'Festival', tamaño B. Como se mencionó para el caso de los grupos clasificados en este intervalo de tamaño los valores de las variables L*, a* y b* descienden conforme el fruto va madurando. Para este grupo de fresas, en los Anexos 9 y 10 se muestran las tablas ANOVA para cada una de las variables de color. En estas gráficas se muestran los valores P, que como se puede observar en todos los casos fue menor a 0,05, lo que indica que hay diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de los niveles de "grado de madurez". Sin embargo, la prueba de Tukey indica diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95 % entre el grupo 6B_F y los grupos 4C_F y 2C_F para la variable h_{ab}.

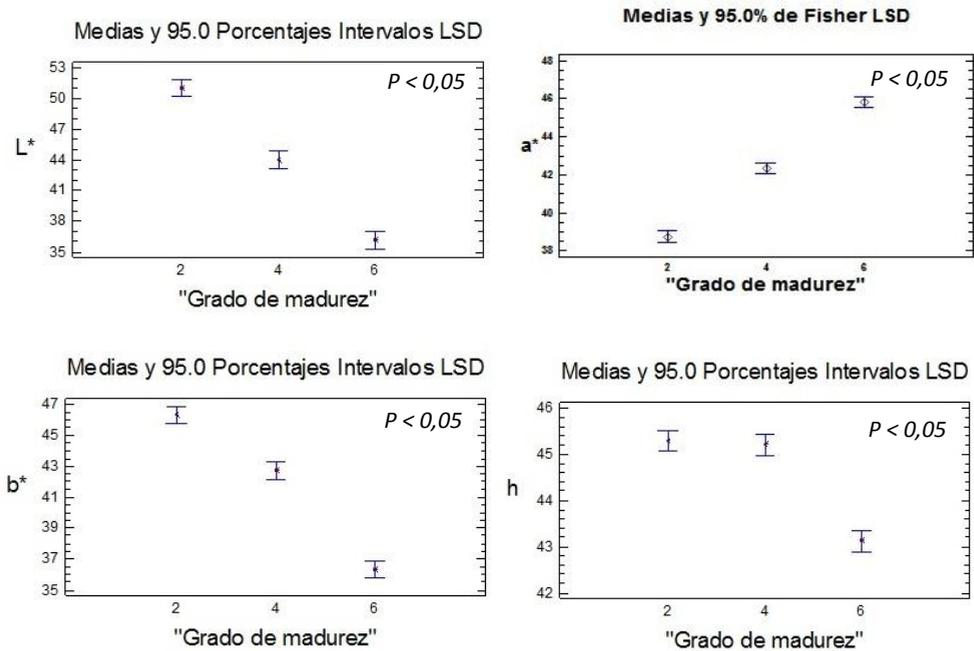


Figura 5-12. Comportamiento de las variables de color para las fresas de la variedad 'Festival', tamaño B, en los tres niveles de "grado de madurez" predeterminado.

En el caso de la variables de color L^* y b^* para los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño C (Figura 5-13), los valores muestran una disminución conforme el fruto va madurando. En el caso de la variable L^* se puede observar que a partir del "grados de madurez" 4, hay un descenso importante de esta variable muy similar al comportamiento de b^* .

Asimismo, el comportamiento de los valores de a^* , b^* y h_{ab} son casi similares a los que presentaron los valores de las fresas tamaño B. En este caso la prueba ANOVA muestra que al menos entre dos grupos hay una diferencia estadísticamente significativa para las variables de color (véase Anexo 10).

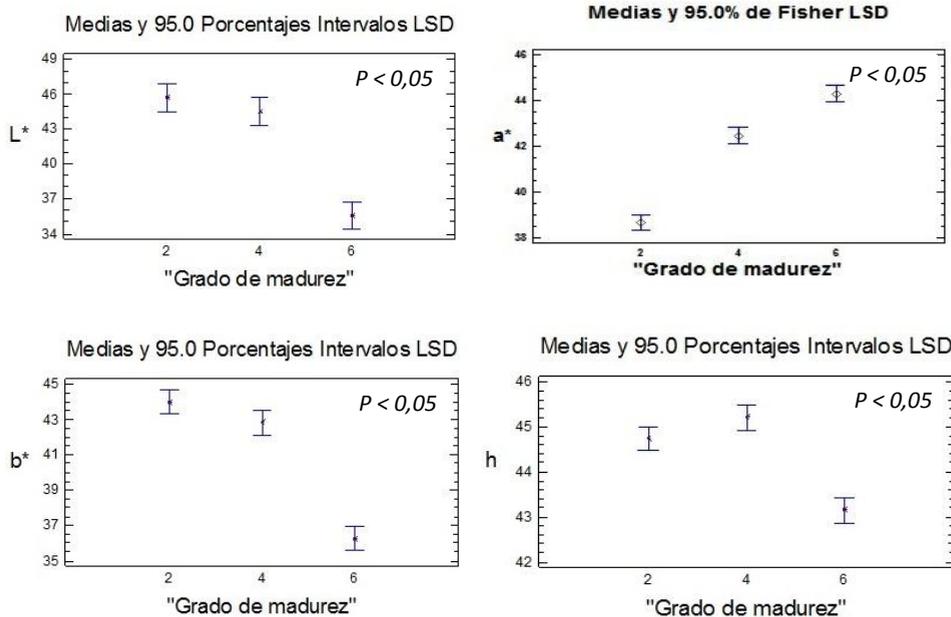


Figura 5-13. Comportamiento de las variables de color para las fresas de la variedad 'Festival', tamaño C, en los tres niveles de "grado de madurez" predeterminado.

En estas gráficas se muestran los valores P , que como se puede observar en todos los casos fue menor a 0,05, lo que indica que hay diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de los niveles de "grado de madurez". Sin embargo, la prueba de Tukey indica diferencias estadísticamente significativas a un nivel de confianza del 95 % entre el grupo $6C_F$ y los grupos $4C_F$ y $2C_F$ para las variables L^* , b^* y h_{ab} . En el Anexo 14, se muestra el diagrama de dispersión de los puntos obtenidos a partir de los valores de las variables de color para los grupos de la variedad 'Festival', tamaño B y C.

En la Tabla 5-11 se muestran los valores de la diferencia de color ΔE^*_{ab} . Para el caso de la comparación entre los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño B las diferencias son muy similares. La diferencia entre los grupos pertenecientes a los "grados de madurez" predeterminados 6 y 4 es de 9,36, y

entre 4 y 2 de 9,78. En el caso de los grupos tamaño C la diferencia entre 4 y 2 es de 2,77 lo que indica, que en relación al color, hay una importante semejanza entre grupos, esto puede deberse al factor humano durante la clasificación de las fresas utilizando los niveles de “*grado de madurez*” a través de los colores (véase Figura 4-9). En el caso de los grupos 6 y 4 se obtuvo un valor de ΔE^*_{ab} igual a 10,43.

Tabla 5-11.
 Valores de ΔE^*_{ab} entre los grupos de las fresas variedad ‘Festival’, tamaños B y C.

“ <i>Grados de madurez</i> ”	ΔE^*_{ab}	
	Tamaño B	Tamaño C
6-4	9,36	10,43
4-2	9,78	2,77

De la misma manera que para los valores de las variables de L^* , a^* y b^* obtenidos durante la medición del color a las fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, en la Tabla 5-12 se muestran los porcentajes de los casos clasificados correctamente según el análisis discriminante. De las 75 fresas de los grupos pertenecientes al intervalo de tamaño B, se desarrollo a través de esta prueba estadística un modelo para diferenciar entre los tres niveles de “*grado de madurez*”. En este caso 93,33 % de los casos fueron clasificados correctamente. Para los tres “*grados de madurez*” 6, 4 y 2 se obtuvieron porcentajes de casos correctamente clasificados de 100, 88 y 92, respectivamente. Estos porcentajes fueron mayores que los obtenidos para las fresas de la variedad ‘Sweet charlie’

En la siguiente ecuación, de la primera función estandarizada con un valor de $P < 0,05$ al 95 % de nivel de confianza podemos ver cual de las tres variables contribuye significativamente al momento de discriminar. En este caso, la variable de color

determinante para diferenciar entre los grupos es a^* con un valor de 1,11833 superior a los valores de L^* y b^* .

$$-0,504348(L^*) + 1,11833(a^*) - 0,795754(b^*) \quad (30)$$

Tabla 5-12.

Resultados del análisis discriminante de los “*grados de madurez*” según las variables de color para fresas de la variedad ‘Festival’, tamaño B.

“ <i>Grado de madurez</i> ”	Número de muestras	Pronosticados “ <i>grado de madurez</i> ”		
		Porcentaje de casos correctamente clasificados: 100 %		
		2	4	6
2	25	25 (100,00 %)	0 (0,00 %)	0 (0,00 %)
4	25	0 (0,00 %)	25 (100,00 %)	0 (0,00 %)
6	25	0 (0,00 %)	0 (0,00 %)	25 (100,00 %)

Las funciones utilizadas para clasificar las observaciones en cada uno de los 3 niveles de “*grado de madurez*” se muestran en la Tabla 5-13.

Estas funciones se usan para predecir teóricamente a que nivel de “*grado de madurez*” pertenecen las nuevas observaciones.

Tabla 5-13.

Funciones de clasificación para cada uno de los tres “*grados de madurez*” utilizando las variables de color para fresas de la variedad ‘Festival’, tamaño B.

“ <i>Grado de madurez</i> ”	Función de clasificación
2	$-728,322 + 0,758175(L^*) + 35,4228(a^*) - 0,924015(b^*)$
4	$-868,243 - 0,392113(L^*) + 42,7044(a^*) - 1,33896(b^*)$
6	$-1057,01 - 1,54927(L^*) + 50,8674(a^*) - 4,49769(b^*)$

En el caso de las fresas pertenecientes al intervalo de tamaño C (Tabla 5-14) el análisis discriminante muestra que el 94,67 %, del total de las muestras, fueron clasificadas correctamente. Para los grupos 6, 4 y 2 se obtuvieron porcentajes de 96, 92 y 96, respectivamente. La variable determinante, al igual que en las fresas tamaño B, es a^* , con un valor de 1,32674. La ecuación de la función discriminante con $P < 0,05$ estadísticamente significativa al 95 % de nivel de confianza es:

$$-0,538785(L^*) + 1,32674(a^*) - 0,974931(b^*) \quad (31)$$

Tabla 5-14.

Resultados del análisis discriminante de los “*grados de madurez*” según las variables de color para fresas de la variedad ‘Festival’, tamaño C.

“Grado de madurez”	Número de muestras	Pronosticados “grado de madurez”		
		Porcentaje de casos correctamente clasificados: 97,33 %		
		2	4	6
2	25	24 (96,00 %)	1 (4,00 %)	0 (0,00 %)
4	25	0 (0,00 %)	25 (100,00 %)	0 (0,00 %)
6	25	0 (0,00 %)	1 (4,00 %)	24 (96,00 %)

Las funciones utilizadas para clasificar las observaciones en cada uno de los 3 niveles de “*grado de madurez*” se muestran en la Tabla 5-15. Como se ha mencionado estas funciones se usan para predecir teóricamente a que nivel de “*grado de madurez*” pertenecen las nuevas observaciones.

Tabla 5-15.

Funciones de clasificación para cada uno de los tres “*grados de madurez*” utilizando las variables de color de fresas de la variedad ‘Festival’, tamaño C.

“Grado de madurez”	Función de clasificación
2	$-497,371 - 1,29365(L^*) + 28,9978(a^*) - 1,56886(b^*)$
4	$-622,763 - 1,78904(L^*) + 34,3778(a^*) - 3,19179(b^*)$
6	$-739,896 - 2,5923(L^*) + 39,9854(a^*) - 5,56915(b^*)$

5.3.4 Resultados de la medición de color para la variedad 'Camino real'

En la Tabla 5-16 se puede observar que los valores de la luminosidad L^* son los que presentan un comportamiento más consistente, ya que estos disminuyen conforme va madurando el fruto, comportamiento observado en las variedades 'Sweet charlie' y 'Festival'. Para el caso de los grupos clasificados en el intervalo de tamaño B, los valores de L^* para los "grados de madurez" 6, 4 y 2 son: 34,2, 53,3 y 63,5, respectivamente.

Para estos grupos, el análisis LSD muestra que hay diferencias estadísticamente significativas para un intervalo de confianza del 95 %. Para los grupos clasificados en el intervalo de tamaño C, los valores de L^* para 6, 4 y 2 son: 37, 53,4 y 66, respectivamente. El análisis estadístico muestra que también existen diferencias significativas entre grupos. Para los valores de las coordenadas cromáticas a^* y b^* se encontraron, en ambas, diferencias estadísticamente significativas entre los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño C. Mientras que para los grupos tamaño B se encontró esta diferencia para los valores de la variable b^* .

En el caso de los valores del ángulo de tono métrico, aunque no haya una tendencia en el comportamiento de los datos, se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos correspondientes al intervalo de tamaño C.

Tabla 5-16.

Valores medios de las variables L*, a*, b* y h_{ab} para fresas de la variedad 'Camino real', tamaños B y C.

Grupo ¹	Variables de color ²			
	L*	a*	b*	h _{ab} (grados)
6B _{CR}	x = 34,20 σ = 2,40 a (30,40 – 39,90)	x = 43,90 σ = 1,20 b (42,70 – 47,20)	x = 35,60 σ = 1,70 a (32,80 – 39,70)	x = 42,94 σ = 0,55 a (42,00 – 44,39)
4B _{CR}	x = 53,30 σ = 4,20 b (46,50 – 61,00)	x = 44,10 σ = 0,90 b (42,50 – 45,70)	x = 44,30 σ = 1,90 b (40,50 – 49,30)	x = 45,00 σ = 0,79 b (43,62 – 47,19)
2B _{CR}	x = 63,50 σ = 3,70 c (56,70 – 74,70)	x = 38,20 σ = 1,10 a (36,40 – 40,60)	x = 41,00 σ = 2,50 c (36,50 – 46,30)	x = 43,03 σ = 1,48 a (37,67 – 45,64)
6C _{CR}	x = 37,00 σ = 2,30 a (31,90 – 41,00)	x = 43,60 σ = 1,00 c (42,30 – 46,30)	x = 37,50 σ = 1,80 a (33,30 – 40,80)	x = 43,53 σ = 0,60 a (42,18 – 44,60)
4C _{CR}	x = 53,40 σ = 4,10 b (45,00 – 61,20)	x = 44,20 σ = 0,70 b (43,10 – 45,60)	x = 44,50 σ = 1,70 b (41,40 – 47,60)	x = 45,00 σ = 0,83 b (43,89 – 46,50)
2C _{CR}	x = 66,00 σ = 5,60 c (61,30 – 88,60)	x = 39,50 σ = 1,10 a (36,80 – 41,30)	x = 40,50 σ = 2,40 c (37,60 – 47,50)	x = 42,61 σ = 1,04 c (41,59 – 45,73)

¹ El valor numérico indica el nivel de "grado de madurez" y la letra el tamaño según la NOM.

² Valores mínimo y máximo entre paréntesis.

Subíndices con misma letra indica que no hay diferencias significativas entre los grupos.

En las Figuras 5-14 y 5-15 se muestra el comportamiento de los valores mostrados en la Tabla 5-16 de cada una de las variables en estudio para los tres diferentes "grados de maduración". Para las fresas tamaño B según la variable L*, la prueba ANOVA (véase Anexo 11) muestra una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los tres niveles de "grado de madurez" para un intervalo de confianza del 95 %.

Aunque esta misma diferencia se encontró para las variables a* y b*, se observa que entre los niveles 2 y 4 hay un cambio, siendo este más pronunciado para la variable b*. Para la variable a* los valores muestran un ascenso importante del nivel de "grado de madurez" 4 al 6. Este comportamiento posiblemente se deba a las transformaciones estructurales de las antocianinas debido a su sensibilidad a los cambios en el pH lo cual afecta la tonalidad y saturación del color (Wrolstad,

1993). La prueba de Tukey muestra que entre los grupos 2B_{CR} y 4B_{CR} para el caso de la variable a*, no hay diferencias estadísticamente diferentes.

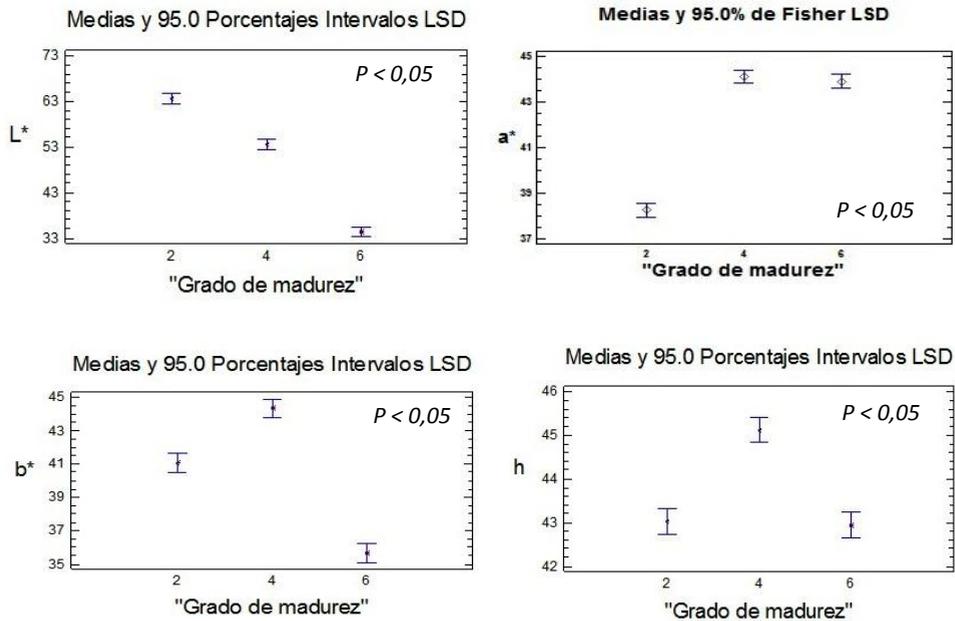


Figura 5-14. Comportamiento de las variables de color para las fresas de la variedad 'Camino real', tamaño B, en los tres niveles de "grado de madurez" predeterminado.

En la Figura 5-15 se muestran los gráficos de medias para los valores de las variables L*, a*, b* y h* presentados en la Tabla 5-16 correspondientes a los grupos de fresas de la variedad 'Camino real', tamaño C. Como se puede observar la prueba ANOVA (véase Anexo 12) muestra que entre los diferentes niveles de "grado de madurez" hay una diferencia estadísticamente significativa con valores de $P < 0,05$ para las cuatro variables de color. En este caso la variable L* sigue siendo la que presenta una tendencia clara, ya que ésta disminuye conforme va madurando el fruto, comportamiento que se ha presentado en las variedades 'Sweet charlie' y 'Festival'. En el caso de las variables a* y b*, estas presentan

comportamientos muy similares a las fresas clasificadas dentro del intervalo de tamaño B.

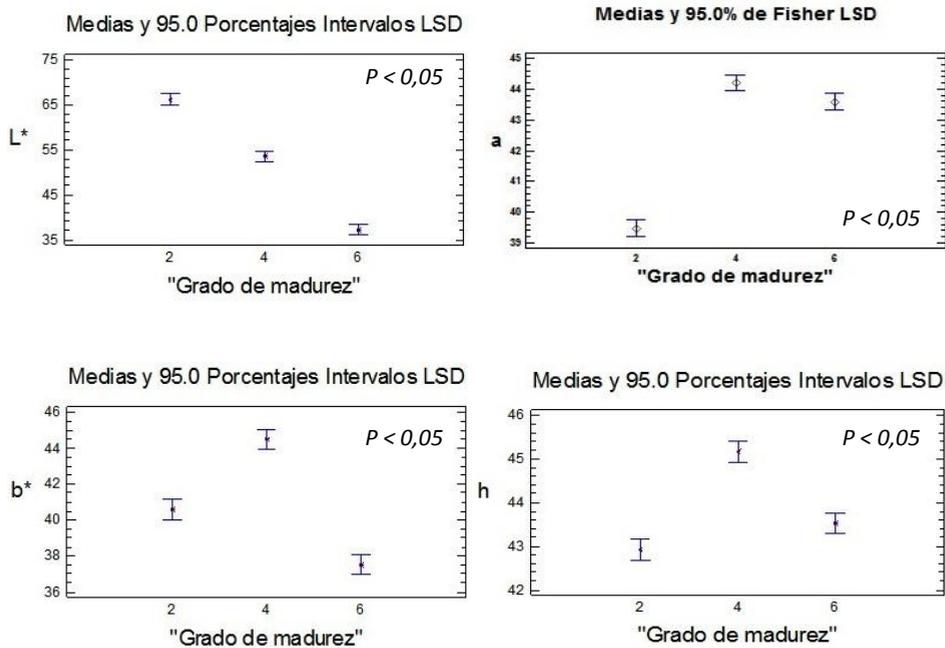


Figura 5-15. Comportamiento de las variables de color para las fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaño C, en los tres niveles de “grado de madurez” predeterminado.

En el Anexo 15, se muestra el diagrama de dispersión de los puntos obtenidos a partir de los valores de las variables de color para los grupos de la variedad ‘Camino real’, tamaño B y C.

Las diferencias colorimétricas (ΔE^*_{ab}) entre los grupos clasificados dentro de los “grados de madurez” 6, 4 y 2 se muestran en la Tabla 5-17. La diferencia entre los “grados de madurez” 6 y 4 para los tamaños B y C son de 20,84 y 17,69, respectivamente y para 4 y 2 de 10,20 y 12,62. Con esto se puede observar que existe una considerable diferencia de color entre los grupos. Siendo menor entre los “grados de madurez” 4 y 2.

Tabla 5-17.
 Valores de ΔE^*_{ab} entre los grupos de las fresas variedad
 ‘Camino real’, tamaños B y C.

"Grados de madurez"	ΔE^*_{ab}	
	Tamaño B	Tamaño C
6-4	20,84	17,69
4-2	10,20	12,62

En general, entre los grupos pertenecientes a la variedad ‘Camino real’ se observaron los valores más altos de ΔE^*_{ab} , seguido de la variedad ‘Festival’. Esto es correcto ya que los niveles de “grado de madurez” utilizados para estas variedades están más distanciados (2, 4 y 6). Los grupos pertenecientes a la variedad ‘Sweet charlie’ presentaron en promedio valores de ΔE^*_{ab} más bajos, esto debido a que se utilizaron estadíos más cercanos (4, 5 y 6).

En relación a la prueba estadística de análisis discriminante, para el caso de las fresas ‘Camino real’ pertenecientes al intervalo de tamaño B, los resultados muestran que el 92 % de 75 muestras fueron clasificadas correctamente, mientras que para el tamaño C el 94,67 %. En las Tablas 5-18 y 5-19 se muestran los porcentajes para cada uno de los “grados de madurez”. En el caso de las fresas clasificadas dentro del intervalo de tamaño B se obtuvieron porcentajes del 88,88 y 100 de casos correctamente clasificados para los “grados de madurez” 2, 4 y 6, respectivamente. Mientras que en el caso de los grupos de fresas tamaño C se obtuvieron para 2, 4 y 6 porcentajes de 92, 92 y 100, respectivamente.

De los coeficientes de las siguientes funciones utilizadas para diferenciar entre los tres niveles de “grado de madurez” se puede observar que la variable L^* , en el caso de las fresas tamaño B (ecuación 32), es determinante al momento de discriminar

ya que presenta un valor de 0,84022, mientras que para los grupos tamaño C (ecuación 33), es también L^* con un valor de 0,846855.

$$-0,84022(L^*) - 0,728275(a^*) + 0,573767(b^*) \quad (32)$$

$$0,846855(L^*) - 0,537549(a^*) - 0,360781(b^*) \quad (33)$$

Tabla 5-18.

Resultados del análisis discriminante de los “*grados de madurez*” según las variables de color para fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaño B.

“Grado de madurez”	Número de muestras	Pronosticados “grado de madurez”		
		Porcentaje de casos correctamente clasificados: 100 %		
		2	4	6
2	25	25 (100,00 %)	0 (0,00 %)	0 (0,00 %)
4	25	0 (0,00 %)	25 (100,00 %)	0 (0,00 %)
6	25	0 (0,00 %)	0 (0,00 %)	25 (100,00 %)

Tabla 5-19.

Resultados del análisis discriminante de los “*grados de madurez*” según las variables de color para fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaño C.

“Grado de madurez”	Número de muestras	Pronosticados “grado de madurez”		
		Porcentaje de casos correctamente clasificados: 100 %		
		2	4	6
2	25	25 (100,00 %)	0 (0,00 %)	0 (0,00 %)
4	25	0 (0,00 %)	25 (100,00 %)	0 (0,00 %)
6	25	0 (0,00 %)	0 (0,00 %)	25 (100,00 %)

Las funciones utilizadas para clasificar las observaciones en cada uno de los 3 niveles de “*grado de madurez*” para las fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaño B, se muestran en la Tabla 5-20. Estas funciones se usan para predecir

teóricamente a que nivel de “grado de madurez” pertenecen las nuevas observaciones.

Tabla 5-20.
 Funciones de clasificación para cada uno de los tres “grados de madurez” utilizando las variables de color de fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaño B.

“Grado de madurez”	Función de clasificación
2	$-803,933 + 4,3053(L^*) + 28,9138(a^*) + 5,49762(b^*)$
4	$-971,095 + 3,195596(L^*) + 35,0904(a^*) + 4,97591(b^*)$
6	$-889,394 + 1,34222(L^*) + 37,7121(a^*) + 2,0789(b^*)$

Las funciones utilizadas para clasificar las observaciones en cada uno de los 3 niveles de “grado de madurez” para las fresas de la variedad ‘Camino real’, pertenecientes a los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño C se muestran en la Tabla 5-21. Como se ha mencionado estas funciones se usan para predecir teóricamente a que nivel de “grado de madurez” pertenecen las nuevas observaciones.

Tabla 5-21.
 Funciones de clasificación para cada uno de los tres “grados de madurez” utilizando las variables de color de fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaño C.

“Grado de madurez”	Función de clasificación
2	$-1175 + 4,51052(L^*) + 42,0478(a^*) + 9,63543(b^*)$
4	$-1373,04 + 3,84074(L^*) + 47,2173(a^*) + 10,1286(b^*)$
6	$-1225,95 + 2,74478(L^*) + 46,955(a^*) + 8,03282(b^*)$

Como se ha observado la variable de color L^* mostró, para las tres variedades de fresa, una disminución en su valor conforme aumenta el “grado de madurez”, como era de esperar. En el caso de los valores de las variables a^* y b^* , se observó

de manera general una disminución conforme el fruto madura en algunos casos con una disminución más evidente entre los grupos pertenecientes a los niveles de "grado de madurez" 4 y 6. Solo para el caso de la variedad 'Sweet charlie' se observó un aumento de la variable a^* cuando esta madura. Los valores de a^* y b^* son simplemente coordenadas que indirectamente están relacionadas con el tono y la saturación pero que son más difíciles de interpretar separadamente (citado en McGuire, 1992). Con los datos de las tres variables de color se observó que conforme el fruto va madurando, el color de la superficie de la fresa cambia de un amarillo paja al rojo, este comportamiento se observó en las tres variedades de fresa. En el caso del ángulo cromático (h_{ab}) se observó en todas las variedades una disminución a partir del nivel de "grado de madurez" 4, esto indica, que en el diagrama de cromaticidad (Figura 4-10) los valores de h_{ab} están cercanos al eje correspondiente a valores positivos de a^* que corresponde a los tonos relacionados con el color rojo. Los valores obtenidos de las diferencias colorimétricas fueron en general mayores a cinco puntos por lo que se considera que existe una diferencia de color significativa entre los diferentes niveles de "grado de madurez". La ΔE^*_{ab} fue más evidente entre los grupos clasificados en los niveles de "grado de madurez" 2, 4 y 6.

Finalmente, los resultados obtenidos de la prueba de análisis discriminante muestran porcentajes altos de muestras correctamente clasificadas para los grupos pertenecientes a las fresas de las variedades 'Festival' y 'Camino real', en relación a su "grado de madurez" o clasificación subjetiva según la apreciación del color externo. En el caso de las fresas de la variedad 'Sweet charlie' los porcentajes de casos correctamente clasificados fueron bajos, 70 % para los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño B y 63,67 % para C. Esto era esperado, ya que la diferencia entre los niveles de "grado de maduración" 4 y 5, y 5 y 6 es mínima y por

ser una clasificación subjetiva donde el factor humano es importante el margen de error es mayor.

La medición del color, como se ha visto, es una técnica no destructiva ampliamente utilizada por su alta relación con la calidad de los frutos, ya que el color superficial está relacionado con el estado de madurez del fruto (Crisosto, 1994). En este análisis se ha comprobado, cómo **la apreciación subjetiva del color externo que se utiliza para clasificar en “grados de madurez” mediante la norma mexicana está, en la mayoría de los casos, significativamente relacionada con una medición de color de forma objetiva mediante la medida de las coordenadas de color L^* , a^* y b^* , donde L^* y a^* son las coordenadas más relacionadas.** Así mismo, se ha comprobado como en algunos casos, los grupos establecidos mediante la apreciación subjetiva de color (“grado de madurez”) no presentan unas coordenadas de color significativamente diferentes (especialmente b^* y h), indicando una posible inexactitud de la apreciación subjetiva de grados próximos o una dificultad en definir las áreas donde se realizaron las mediciones con el espectrofotómetro.

5.4 Resultados del ensayo de la medida destructiva de la firmeza

5.4.1 La firmeza destructiva según el “grado de madurez” y la variedad

El análisis de varianza de los efectos de los factores, variedad, “grado de madurez” (4 y 6) y tamaño (categorías B y C) en la variable de firmeza destructiva, mostró el efecto altamente significativo de los factores variedad y “grado de madurez”, así como de la interacción de ambos. El factor categoría de tamaño no afectó de forma significativa a la variabilidad de la firmeza.

Las tres variedades presentaron valores de firmeza significativamente distintos, siendo 'Festival' la que registró valores significativamente más elevados y 'Sweet charlie' la que registró valores significativamente más bajos, Figura 5-16.

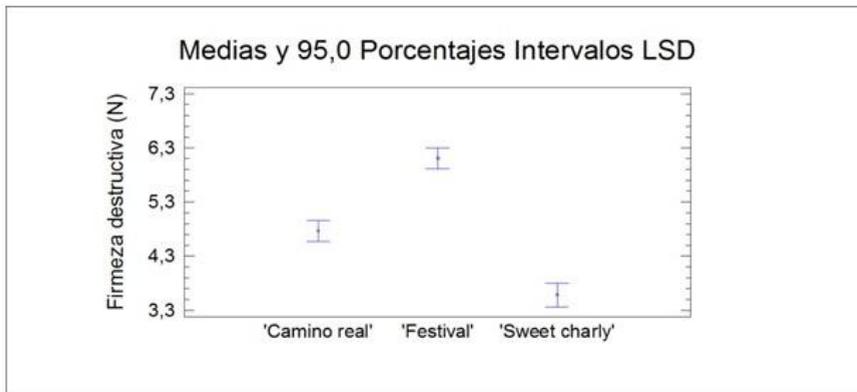


Figura 5-16. Medias e intervalos LSD (95%) de la firmeza destructiva (N) para las distintas variedades.

Las diferencias de los valores de la firmeza destructiva entre variedades se debe a las diferencias varietales y a los diferentes procesos de maduración para cada variedad durante su crecimiento en el campo. Así como, al posible incremento de la firmeza cuando fueron almacenadas a 4 °C.

Como era de esperar, **las fresas clasificadas con “grado de madurez” 4 tenían un valor de firmeza destructiva significativamente mayor que las clasificadas con “grado de madurez” 6.**

5.4.2 Resultados de la medición de la firmeza para la variedad 'Sweet charlie'

En la Tabla 5-22 se muestran los valores medios, las desviaciones estándar y entre paréntesis los mínimos y máximos, de los datos obtenidos durante los ensayos de

la medición destructiva de la firmeza de las fresas de la variedad ‘Sweet charlie’. Como se puede observar para la fresas tamaño B y C, los valores medios de la firmeza disminuyen conforme el fruto va madurando. Para los grupos 6B_s, 4B_s y 2B_s se obtuvieron valores de la firmeza de 3,0, 3,9 y 4,5 N, respectivamente.

Mientras que para los grupos 6C_s, 4C_s y 2C_s fueron de 2,7, 3,5 y 4,1 N, respectivamente. Como se mencionó en el Capítulo 2, la disminución de la firmeza puede estar relacionada con: la pérdida de agua, lo cual provoca que la turgencia descienda; el mayor tamaño que presentan las células con respecto a la de los estadios anteriores, el estado de madurez, el día de la cosecha y principalmente por el tipo de variedad. La prueba de Tukey mostró que entre el grupo 6B_s con los grupos 5B_s y 4B_s hay diferencia estadísticamente significativa entre las medias ya que el valor de *P* es inferior a 0,05, para una nivel de confianza del 95,0 %. Mientras que para los grupos pertenecientes al intervalo de tamaño C, la prueba LSD mostró diferencia estadísticamente significativa entre los tres niveles del factor “*grado de madurez*” (*P* < 0,05 para un nivel de confianza del 95,0 %) . En el Anexo 17, se muestran las gráficas de caja y bigotes para cada uno de los grupos.

Tabla 5-22.
 Valores medios de la firmeza para fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaños B y C.

Grupo ¹	Número de muestras	Firmeza ² (N)	Grupo ¹	Número de muestras	Firmeza ² (N)
6B _s	20	x = 3,0 $\sigma = 1,07$ a (1,1 – 5,5)	6C _s	20	x = 2,7 $\sigma = 0,73$ a (1,6 – 4,3)
5B _s	20	x = 3,9 $\sigma = 0,81$ b (2,7 – 5,3)	5C _s	19	x = 3,5 $\sigma = 0,79$ b (2,4 – 5,9)
4B _s	20	x = 4,5 $\sigma = 1,18$ b (2,3 – 6,6)	4C _s	19	x = 4,1 $\sigma = 1,02$ c (2,4 – 6,3)

¹ El valor numérico indica el nivel de “*grado de madurez*” y la letra el tamaño según la NOM.

² Valores mínimo y máximo entre paréntesis.

Subíndices con misma letra indica que no hay diferencias significativas entre los grupos.

En la Figura 5-17, se puede observar que las fresas tamaño C son menos resistentes que las fresas tamaño B.

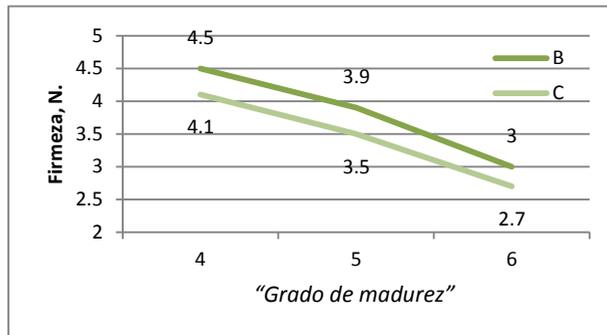


Figura 5-17. Gráfica de los valores medios de la firmeza para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaños B y C.

5.4.3 Resultados de la medición de la firmeza para la variedad 'Festival'

En la Tabla 5-23 se muestran los valores medios, las desviaciones estándar y entre paréntesis los mínimos y máximos para cada uno de los grupos definidos en el Capítulo 4. Como se puede observar la prueba LSD muestra que tanto para los grupos clasificados en el intervalo B como para los del C, existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores medios de la variable dependiente firmeza, para los niveles del factor "grado de madurez" ($P = 0,05$ para un nivel de confianza del 95,0 %). Para los grupos $6B_F$, $4B_F$ y $2B_F$ se obtuvieron valores de firmeza de 4,87, 7,10 y 8,89 N., respectivamente; y para $6C_F$, $4C_F$ y $2C_F$ valores de 5,30, 7,16 y 10,18 N., respectivamente. En ambos casos se puede ver que conforme aumenta el "grado de madurez" los valores de la firmeza van disminuyendo.

Tabla 5-23.

Valores medios de la firmeza para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C.

Grupo ¹	Número de muestras	Firmeza ² (N)	Grupo ¹	Número de muestras	Firmeza ² (N)
6B _F	25	$\bar{x} = 4,9$ $\sigma = 1,38$ a (3,5 – 9,7)	6C _F	25	$\bar{x} = 5,3$ $\sigma = 1,74$ a (2,5 – 9,7)
4B _F	25	$\bar{x} = 7,1$ $\sigma = 1,26$ b (5,1 – 10,1)	4C _F	25	$\bar{x} = 7,2$ $\sigma = 2,63$ b (3,9 – 14,0)
2B _F	25	$\bar{x} = 8,9$ $\sigma = 1,69$ c (6,5 – 13,06)	2C _F	25	$\bar{x} = 10,2$ $\sigma = 3,05$ c (5,3 – 18,5)

¹ El valor numérico indica el nivel de "grado de madurez" y la letra el tamaño según la NOM.

² Valores mínimo y máximo entre paréntesis.

Subíndices con misma letra indica que no hay diferencias significativas entre los grupos.

En la Figura 5-18 se muestra el comportamiento de los datos mostrados en la tabla previa. Como se puede observar los frutos de los grupos clasificados en el intervalo de tamaño C son ligeramente más resistentes que los de tamaño B. En el Anexo 17 se puede observar la distribución de los datos.

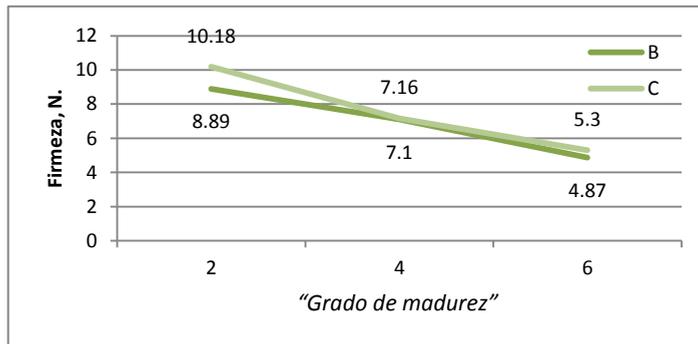


Figura 5-18. Gráfica de los valores medios de la firmeza para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C.

5.4.4 Resultados de la medición de la firmeza para la variedad ‘Camino real’

En la Tabla 5-24 se muestran los valores medios, las desviaciones estándar y entre paréntesis los mínimos y máximos de la firmeza para las fresas variedad ‘Camino real’ para cada uno de los grupos. Como se puede observar, y de acuerdo a los resultados obtenidos en la prueba LSD, existe diferencia estadísticamente significativa entre los valores medios de la variable dependiente firmeza, para los niveles del factor “*grado de madurez*” ($P = 0,05$ para un nivel de confianza del 95,0 %). Para los grupos 6B_{CR}, 4B_{CR} y 2B_{CR} se obtuvieron valores de la firmeza de 2,9, 5,8 y 7,9 N., respectivamente. Mientras que para los grupos 6C_{CR}, 4C_{CR} y 2C_{CR} de 3,4, 6,7 y 8,0, respectivamente. Nuevamente podemos ver que conforme el fruto va madurando la firmeza disminuye.

Tabla 5-24.
 Valores medios de la firmeza para fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaños B y C.

Grupo ¹	Número de muestras	Firmeza ² (N)	Grupo ¹	Número de muestras	Firmeza ² (N)
6B _{CR}	25	$x = 2,9$ $\sigma = 0,8$ a (1,9 – 4,7)	6C _{CR}	25	$x = 3,4$ $\sigma = 0,8$ a (2,1 – 5,5)
4B _{CR}	25	$x = 5,8$ $\sigma = 1,5$ b (3,6 – 8,0)	4C _{CR}	25	$x = 6,7$ $\sigma = 1,4$ b (4,5 – 10,4)
2B _{CR}	25	$x = 7,9$ $\sigma = 1,8$ c (4,9 – 11,4)	2C _{CR}	25	$x = 8,0$ $\sigma = 1,8$ c (4,9 – 11,8)

¹ El valor numérico indica el nivel de “*grado de madurez*” y la letra el tamaño según la NOM.

² Valores mínimo y máximo entre paréntesis.

Subíndices con misma letra indica que no hay diferencias significativas entre los grupos.

Con los datos de la Tabla 5-24 se generó el gráfico de la Figura 5-19 donde se muestra el comportamiento de la firmeza conforme va madurando el fruto. Se puede ver que al igual que sucede con los valores de las fresas variedad ‘Festival’, los frutos de los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño C son más

resistentes que los de tamaño B. En el Anexo 17, se muestra la distribución de estos datos.

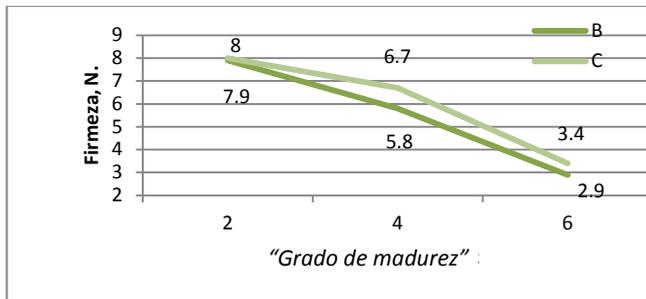


Figura 5-19. Gráfica de los valores medios de la firmeza para fresas de la variedad 'Camino real', tamaños B y C.

Como era de esperar los valores obtenidos de las mediciones de la firmeza destructiva mostraron un descenso conforme madura el fruto. El porcentaje de pérdida de firmeza fue mayor para las fresas de la variedad 'Camino real' con una pérdida del 64 % para los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño B y del 58 % para el C. En el caso de las fresas 'Festival' que fueron las que presentaron los valores más altos de firmeza, tuvieron una pérdida de 45 % para B y de 49 % para C. Y finalmente, para las fresas de la variedad 'Sweet charlie' los porcentajes de pérdida de firmeza fueron de 34 % para B y de 35 % para C.

5.5 Resultados del ensayo de la medida no destructiva de la impedancia bio-eléctrica y su relación con el "grado de madurez"

5.5.1 Características del dispositivo para medir la impedancia bio-eléctrica

Para llevar a cabo los ensayos de la mediciones no destructivas de la impedancia bio-eléctrica en la fresa, se diseñó y construyó un dispositivo que cumple con las

características planteadas en el apartado 4.3.5. Las mediciones se realizan de manera no destructiva, ya que sólo es necesario poner en contacto superficial los electrodos sobre la muestra para realizar las mediciones de impedancia; es económico, ya que los materiales utilizados fueron reciclados del taller del Departamento de Ingeniería Física; es de fácil manejo, ya que cada medición requiere de aproximadamente dos minutos, tiempo necesario para colocar la muestra en el recipiente de nylacero, cubrir las puntas de los electrodos con gel conductor, ponerlos cuidadosamente en contacto con la muestra y realizar la medición con el programa Z-plot® (este procedimiento se podría automatizar con un poco más de trabajo electromecánico); se adapta a diferentes tamaños de muestra ya que la fresa presenta una variabilidad importante en relación a su diámetro ecuatorial por lo que el rango permitido por el prototipo es de 1,8 a 4,0 cm de diámetro; y finalmente que las mediciones tuvieran repetibilidad (r), para ésto se llevaron a cabo pruebas en las que las condiciones de repetibilidad incluían: el mismo procedimiento de medición, el mismo operador, el mismo dispositivo utilizando los mismo parámetros, el mismo lugar y repetición dentro de un período de tiempo corto. Para determinar la repetibilidad del prototipo se realizaron, a una muestra 30 individuos, cinco mediciones de la impedancia, de las cuales se obtuvieron los valores de R_s , CPE-P, CPE-T y R_p . La prueba ANOVA Simple se utilizó para obtener los valores de las variables requeridas por la ecuación 25, la cual es utilizada para determinar el coeficiente de repetibilidad, r . En este caso y con los datos de la Tabla A-1 (véase Anexo 18) se obtuvo un valor de r promedio igual a 0,85, lo que indica que el dispositivo tiene una repetibilidad confiable.

A continuación se presentan los resultados de las mediciones de impedancia para cada una de las tres variedades en estudio obtenidas a partir de la metodología propuesta en el apartado 4.4.3 y utilizando el prototipo descrito en el 4.3.5.

5.5.2 La impedancia bio-eléctrica según el “grado de madurez” y la variedad

El análisis de varianza de los efectos de los factores, variedad, “grado de madurez” (4 y 6) y tamaño (categorías B y C) en la variable de bio-impedancia R_s (relacionada con la resistencia intracelular), mostró el efecto altamente significativo de los factores, así como de la interacción de ambos, Figura 5-20. **El factor categoría de tamaño no afectó de forma significativa a la variabilidad de R_s .**

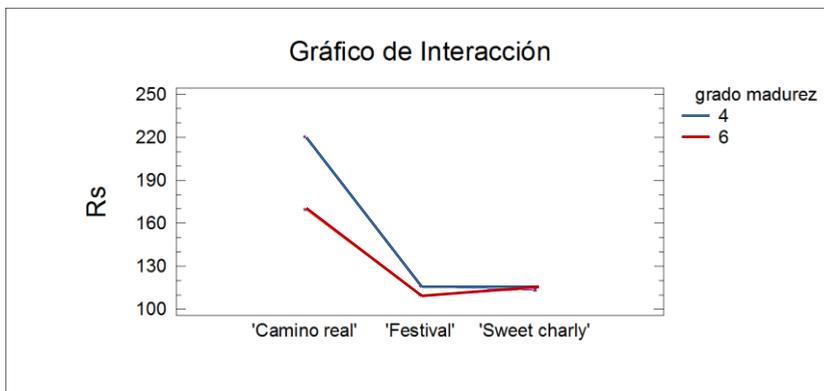


Figura 5-20. Gráfico de interacción, valor de R_s (Ω) según las variedades y los valores de “grado de madurez”.

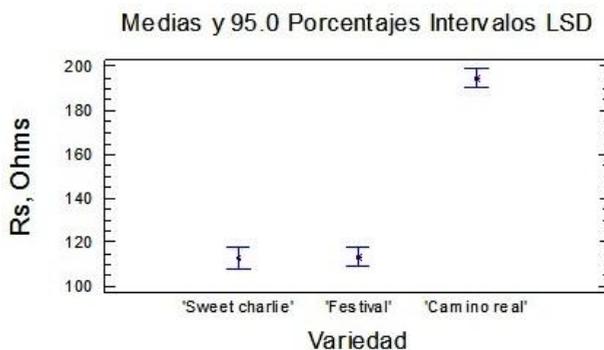


Figura 5-21. Medias e intervalos LSD (95%) de la variable de impedancia R_s (Ω) para las distintas variedades.

La variedad ‘Camino real’ presentó un valor de resistencia intracelular (R_s) mayor que las otras dos variedades, Figura 5-21, siguiendo un patrón similar a la luminosidad L^* , Figura 5-9.

Así mismo, las fresas clasificadas con mayor “grado de madurez” (6) presentaron valores de R_s significativamente menores que las clasificadas de “grado de madurez” menor (4), Figura 5-22. **La resistencia intracelular es menor cuanto mayor “grado de madurez”.** Esto puede ser debido posiblemente a un incremento en la concentración de iones en las vacuolas. La resistencia intracelular esta relacionada principalmente con la resistencia de las vacuolas, ya que estas ocupan el mayor porcentaje del volumen intracelular de las células y contienen una alta concentración de iones (Harker y Maindonald, 1994).

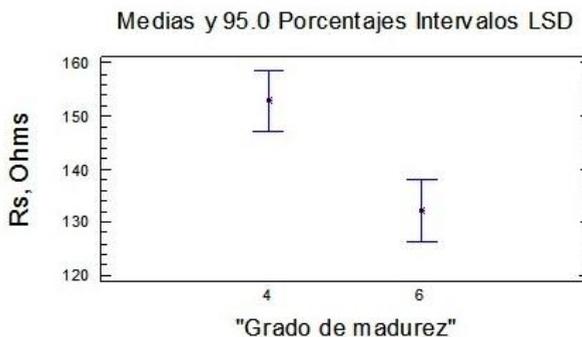


Figura 5-22. Medias e intervalos LSD (95%) de la variable de impedancia R_s (Ω) para los “grados de madurez” 4 y 6, inferior y superior.

El análisis de varianza de los efectos de los factores, variedad, “grado de madurez” (4 y 6) y tamaño (categorías B y C) en la variable de bio-impedancia R_p (relacionada con la resistencia extracelular), mostró también el efecto altamente significativo de los factores, así como de la interacción de ambos. **El factor categoría de tamaño no afectó de forma significativa a la variabilidad de R_p .** La variedad ‘Sweet charlie’

presentó un valor de resistencia extracelular (R_p) mayor que las otras dos variedades, Figura 5-23. Estas diferencias pueden ser debido a las diferencias en la estructura del tejido como arreglo y empaquetado celular y volumen de los espacios intercelulares (Jackson y Harker, 2000).

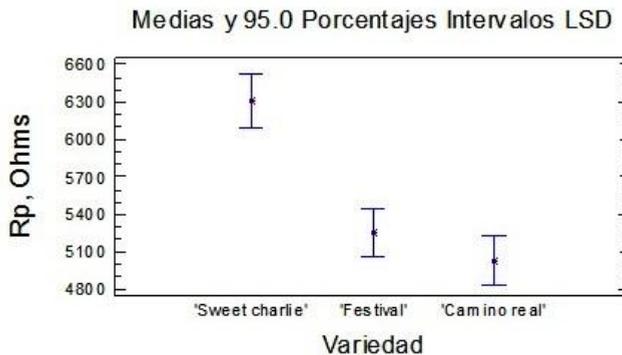


Figura 5-23. Medias e intervalos LSD (95%) de la variable de impedancia R_p (Ω) para las distintas variedades.

El efecto del “grado de madurez” sobre R_p es el contrario que sobre R_s . Los frutos clasificados como “grado de madurez” menor (4) presentaron valores de R_p significativamente menores que las clasificadas de “grado de madurez” mayor (6). **La resistencia extracelular (R_p) parece ser mayor cuanto mayor “grado de madurez”,** lo que puede indicar una reducción en la concentración de iones libres o el incremento de compuestos aislantes como los azúcares (Harker y Forbes, 1997).

El análisis de varianza de los efectos de los factores, variedad, “grado de madurez” (4 y 6) y tamaño (categorías B y C) en la **variable de bio-impedancia CPE-T** (relacionada con la estructura de las membranas celulares, bicapa lipídica), mostró el efecto altamente significativo de los factores variedad y “grado de madurez”, así

como de la interacción de ambos. El factor categoría de tamaño no afectó de forma significativa a la variabilidad de CPE-T.

La variedad 'Festival' presentó valores de CPE-T significativamente más elevados, Figura 5-24. Esto puede indicar que es mayor la capacitancia específica de las membranas celulares de la variedad 'Festival' o a que las membranas de esta variedad tiene una mayor área. A través de esta membrana el agua fluye libremente mientras que para algunos solutos es selectiva.

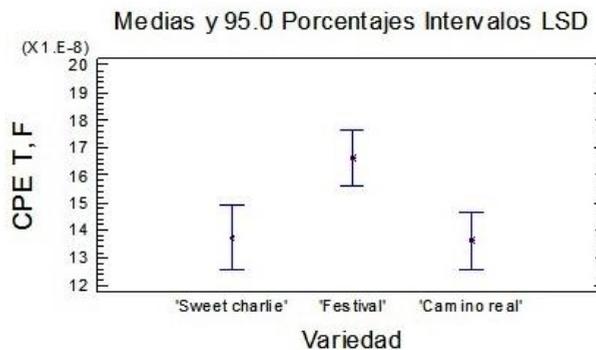


Figura 5-24. Medias e intervalos LSD (95%) de CPE-T para las distintas variedades.

Las fresas clasificadas con "grado de madurez" 6 tenían un valor de CPE-T, significativamente mayor que las clasificadas con "grado de madurez" 4.

El análisis de varianza de los efectos de los factores, variedad, "grado de madurez" (4 y 6) y tamaño (categorías B y C) en la **variable de bio-impedancia CPE-P** (relacionada con la homogeneidad del tejido), mostró el efecto altamente significativo de los factores variedad y "grado de madurez", así como de la interacción de ambos, Figura 5-25. El factor categoría de tamaño no afectó de forma significativa a la variabilidad de CPE-P.

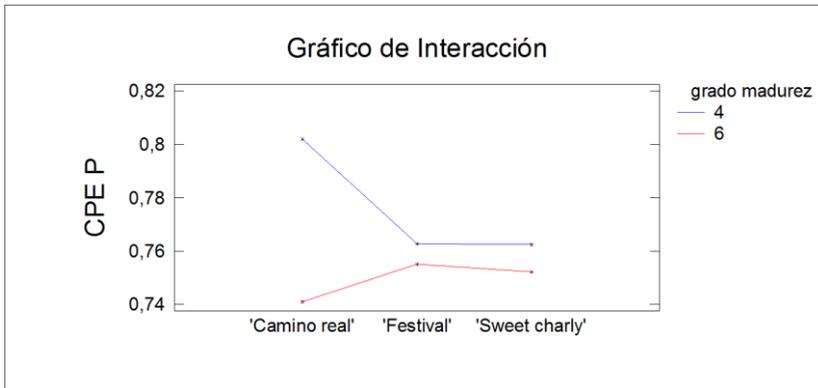


Figura 5-25. Gráfico de interacción, valor de CPE-P según las variedades y los valores de “grado de madurez”.

La variedad ‘Camino real’ presentó valores de CPE-P significativamente más elevados, Figura 5-26.

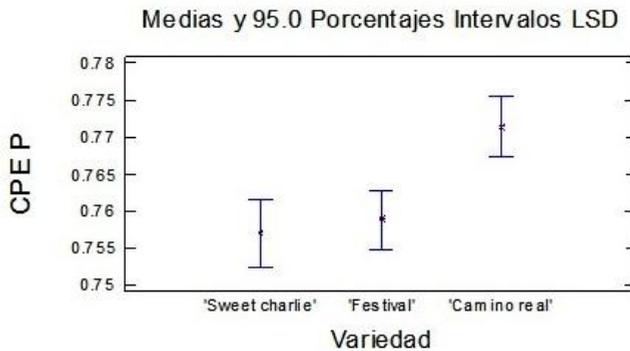


Figura 5-26. Medias e intervalos LSD (95%) de CPE-P para las distintas variedades.

Las fresas clasificadas con “grado de madurez” 6 tenían un valor de CPE-P, relacionado con el grado de homogeneidad, significativamente menor que las clasificadas con “grado de madurez” 4. **El grado de homogeneidad del tejido,**

estimado con CPE-P, disminuye durante el proceso de maduración. Los frutos maduros presentaron valores menores de homogeneidad. Durante la maduración los frutos realizan una serie de procesos fisiológicos complejos que están relacionados con el crecimiento y diferenciación celular, degradación de la pared celular, alteración de las funciones y condiciones de la membrana, cambios en las composiciones intra y extracelular, por mencionar algunos. Todos estos cambios afectan el grado de homogeneidad de los tejidos biológicos el cual está relacionado con el tamaño y forma celular. Por otro lado, el arreglo y empaquetamiento celular, tamaño celular; así como la concentración y movilidad de los iones pueden ser factores que afecten esta variable.

5.5.3 Resultados de la medición de impedancia para la variedad 'Sweet charlie' y su relación con el "grado de madurez"

En la Tabla 5-25 se presentan los resultados de la medición de la impedancia (Z^*) para cada uno de los grupos clasificados dentro de los intervalos de tamaño B y C. Para las variables R_s , CPE-T, CPE-P y R_p , se muestran los valores de las medias aritméticas, las desviaciones estándar y entre paréntesis los mínimos y máximos. La prueba ANOVA muestra, para los valores de CPE-P de los grupos pertenecientes al tamaño B, una diferencia estadísticamente significativa entre grupos, para un intervalo de confianza al 95 %. Los valores de CPE-P para los grupos $6B_s$, $5B_s$ y $4B_s$ son de 0,7475, 0,7544 y 0,7640. En el caso de la variable R_s , para los grupos tamaño B, aunque no hay una diferencia entre los grupos $6B_s$ y $4B_s$ con el grupo $5B_s$, si la hay entre el grupo $6B_s$ y el $4B_s$, y se puede observar que conforme aumenta la madurez de la fresa los valores de R_s tienden a disminuir. Los valores medios de R_s para los grupos $6B_s$, $5B_s$ y $4B_s$ son de 100,70 Ω , 111,80 Ω y 115,30 Ω , respectivamente.

En el caso de los grupos 6C_s, 5C_s y 4C_s los valores de Rs fueron de 121,5 Ω, 95,90 Ω y 111,0 Ω, respectivamente. El aumento de la resistencia en el grupo 6C_s, posiblemente se deba a un incremento en la concentración de compuestos aislantes como los azúcares (Harker *et al*, 1997). Y para los grupos pertenecientes al intervalo de tamaño C, el grupo 6C_s sistemáticamente tuvo valores contrarios a las tendencias esperadas en las cuatro variables medidas, mientras que los grupos 5C_s y 4C_s tienen tendencias similares a los grupos de tamaño B.

Tabla 5-25.

Valores medios de las variables de impedancia para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaño B y C.

Grupo ¹	Variables de impedancia ²			
	Rs (Ω)	CPE-T (F)	CPE-P	Rp (Ω)
6B _s	x = 100,70 σ = 24,50 a (75,00 – 162,80)	x = 1,58E-07 σ = 3,40E-08 a (1,04E-07 – 2,20E-07)	x = 0,7475 σ = 0,0060 a (0,7365 – 0,7600)	x = 5871,50 σ = 1777,30 a (3499,00 – 10901,00)
5B _s	x = 111,80 σ = 29,40 ab (51,40 – 155,80)	x = 1,48E-07 σ = 2,78E-08 ab (9,88E-08 – 2,16E-07)	x = 0,7544 σ = 0,0090 b (0,7354 – 0,7544)	x = 5844,20 σ = 1418,90 a (3410,00 – 10000,00)
4B _s	x = 115,30 σ = 23,90 b (79,00 – 168,50)	x = 1,31E-07 σ = 2,61E-08 b (7,81E-08 – 1,67E-07)	x = 0,7640 σ = 0,0116 c (0,7366 – 0,7884)	x = 6274,30 σ = 1032,10 a (4672,00 – 8541,00)
6C _s	x = 121,50 σ = 26,60 a (88,80 – 175,20)	x = 1,22E-07 σ = 2,80E-08 a (6,64E-08 – 1,70E-07)	x = 0,7570 σ = 0,0095 a (0,7380 – 0,7729)	x = 7498,10 σ = 2140,40 a (4664,00 – 12965,00)
5C _s	x = 95,90 σ = 15,90 b (61,50 – 122,10)	x = 1,62E-07 σ = 2,83E-08 b (1,03E-07 – 2,17E-07)	x = 0,7439 σ = 0,0114 b (0,7160 – 0,7574)	x = 5231,10 σ = 806,10 b (3975,00 – 7234,00)
4C _s	x = 111,00 σ = 17,80 a (82,10 – 154,30)	x = 1,38E-07 σ = 2,78E-08 a (9,78E-08 – 1,90E-07)	x = 0,7608 σ = 0,0076 a (0,7454 – 0,7718)	x = 5851,50 σ = 817,10 b (4048,00 – 7411,00)

¹ El valor numérico indica el nivel de "grado de madurez" y la letra el tamaño según la NOM.

² Valores mínimo y máximo entre paréntesis.

Subíndices con misma letra indica que no hay diferencias significativas entre los grupos.

De la Figura 5-27 a la 5-30 se muestran los gráficos de medias de los valores de cada una de las variables de la impedancia para los dos intervalos de tamaño. Como se observa, en el caso de la variable Rs para los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño B, la prueba de Fisher (LSD) muestra un valor $P > 0,05$ por lo que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre los niveles de "grado de madurez". Sin embargo, si se observa en el gráfico un mínimo descenso en los valores de Rs. Para el mismo intervalo de tamaño, los valores medios de la variable CPE-T muestran un claro ascenso conforme el fruto madura, mientras que

la variable CPE-P disminuye. Para ambas variables, los resultados de la prueba LSD mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de “grado de madurez” con un valor de $P < 0,05$ a un nivel de confianza del 95 %.

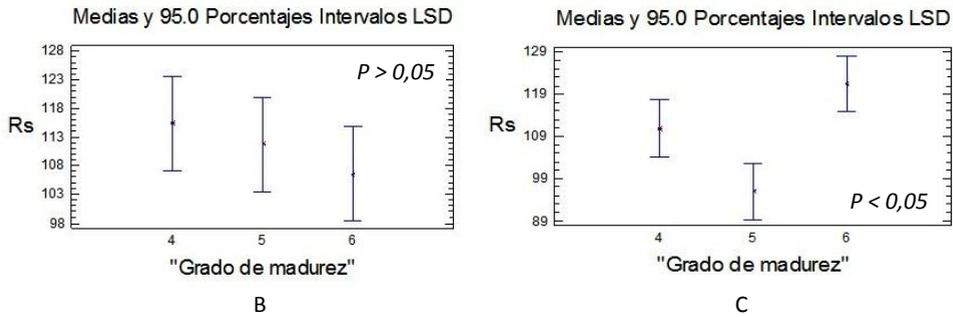


Figura 5-27. Gráficas del comportamiento de los valores de R_s (Ω) para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaños B y C, en los tres diferentes “grados de madurez”.

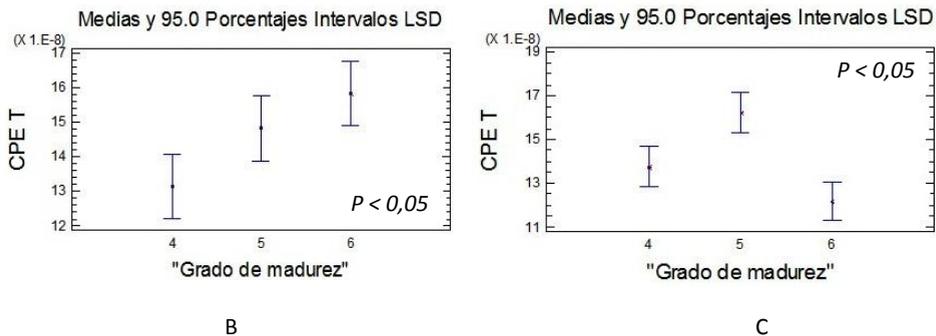


Figura 5-28. Gráficas del comportamiento de los valores de CPE-T (F) para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaños B y C, en los tres diferentes “grados de madurez”.

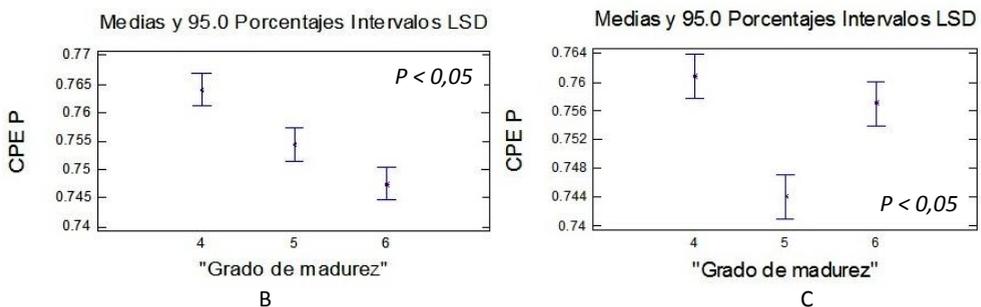


Figura 5-29. Gráficas del comportamiento de los valores de CPE-P para fresas de la variedad 'Sweet charlie' tamaños B y C, en los tres diferentes “grados de madurez”.

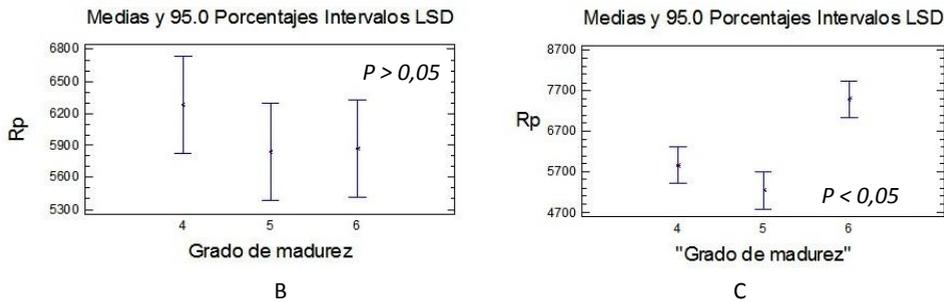


Figura 5-30. Gráficas de los valores de Rp (Ω) para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaños B y C, en los tres diferentes "grados de madurez".

En el caso de los valores de las variables de impedancia para los grupos clasificados dentro del intervalo C, se observó para R_s , CPE-P y R_p un descenso del nivel 4 de "grado de madurez" al 5 y un incremento cuando llega al nivel 6. En el caso de R_s y R_p probablemente este comportamiento se deba a los cambios en la concentración de iones libres o de compuestos con propiedades aislantes (Harker y Forbes, 1997).

Con el objetivo de identificar que variables de impedancia permiten diferenciar a los grupos de "madurez" preestablecidos se utilizó la prueba de Análisis Discriminante. En la Tabla 5-26 se muestran los porcentajes de casos correctamente clasificados, considerando las cuatro variables de impedancia, para los grupos de fresas pertenecientes al intervalo de tamaño B. De los 60 individuos solo el 58,33 % de los casos fueron clasificados correctamente. Para los grados de maduración 4, 5 y 6 se obtuvieron porcentajes de 55, 40 y 80, respectivamente.

Tabla 5-26.

Resultados del análisis discriminante de los “*grados de madurez*” según las variables de impedancia para fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaño B.

“ <i>Grado de madurez</i> ”	Número de individuos	Pronosticados “ <i>grado de madurez</i> ”		
		4	5	6
		Porcentaje de casos correctamente clasificados: 58,33 %		
4	20	11 (55,00 %)	7 (35,00 %)	2 (10,00 %)
5	20	5 (25,00 %)	8 (40,00 %)	7 (35,00 %)
6	20	1 (5,00 %)	3 (15,00 %)	16 (80,00 %)

En este caso y a partir de las dos funciones discriminantes generadas por el análisis discriminante para predecir el “*grado de madurez*” (véase Anexo 16) usando las cuatro variables de la impedancia, el resultado de este análisis muestra que la primera función, con un valor de $P < 0,05$ es estadísticamente significativa al 95 % de nivel de confianza y discrimina en función de CPE-P. Los valores de los coeficientes de la primera función para diferenciar entre los diferentes niveles de “*grado de madurez*” son:

$$-0,081658(Rs) + 0,0846513(CPE-T) + \mathbf{0,964096(CPE-P)} + 0,106825(Rp) \quad (34)$$

Las funciones utilizadas para clasificar las observaciones en cada uno de los 3 niveles de “*grado de madurez*” se muestran en la Tabla 5-27. Estas funciones se usan para predecir teóricamente a que nivel de “*grado de madurez*” pertenecen las nuevas observaciones.

Tabla 5-27.

Funciones de clasificación para cada uno de los tres “*grados de madurez*” utilizando las variables de impedancia de fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaño B.

“Grado de madurez”	Función de clasificación
4	$-5394,75 - 1,44287(Rs) + 3,24692E09(CPE-T) + 13281,0(CPE.P) + 0,0605485(Rp)$
5	$-5301,38 - 1,42705(Rs) + 3,24376E09(CPE-T) + 13159,5(CPE.P) + 0,0601447(Rp)$
6	$-5252,52 - 1,43887(Rs) + 3,25297E09(CPE-T) + 13091,8(CPE.P) + 0,0604581(Rp)$

Para el caso de los grupos de fresas pertenecientes al intervalo de tamaño C la prueba del análisis discriminante (Tabla 5-28), según las variables de impedancia, muestra que el 77,58 % de los casos fueron correctamente clasificados, porcentaje considerablemente alentador para ser pruebas preliminares. Los porcentajes obtenidos para los “*grados de madurez*” 4, 5 y 6 fueron de 73,7, 78,9 y 80, respectivamente.

Tabla 5-28.

Resultados del análisis discriminante de los “*grados de madurez*” según las variables de impedancia para fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaño C.

“Grado de madurez”	Número de individuos	Pronosticados “ <i>grado de madurez</i> ”		
		Porcentaje de casos correctamente clasificados: 77,58 %		
		4	5	6
4	19	14 (73,68 %)	3 (15,79 %)	2 (10,53 %)
5	19	4 (21,05 %)	15 (78,95 %)	0 (0,00 %)
6	20	1 (5,00 %)	3 (15,00 %)	16 (80,00 %)

Los resultados obtenidos de la prueba de análisis discriminante para el caso de los datos reportados en la Tabla 5-28 muestran que la primera función discriminante con un valor de $P < 0,05$ es estadísticamente significativa al 95 % del nivel de confianza y depende principalmente de los valores de CPE-P. Los coeficientes de esta función para diferenciar entre los diferentes niveles de “*grado de madurez*” son:

$$0,334319(Rs) + 0,110568(CPE-T) + \mathbf{0,780666(CPE-P)} + 0,437095(Rp) \quad (35)$$

Las funciones utilizadas para clasificar las observaciones en cada uno de los 3 niveles de “grado de madurez” se muestran en la Tabla 5-29. Estas funciones, como se ha venido mencionado se usan para predecir teóricamente a qué nivel de “grado de madurez” pertenecen las nuevas observaciones.

Tabla 5-29.

Funciones de clasificación para cada uno de los tres “grados de madurez” utilizando las variables de color de fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaño C.

“Grado de madurez”	Función de clasificación
4	$-5786,18 - 0,679184(Rs) + 4,60123E09(CPE-T) + 14017,7(CPE.P) + 0,0595602(Rp)$
5	$-5640,56 - 0,13553(Rs) + 4,5959E09(CPE-T) + 13829,7(CPE.P) + 0,0595839(Rp)$
6	$-5752,44 - 0,685129(Rs) + 4,60461E09(CPE-T) + 13965,2(CPE.P) + 0,0605111(Rp)$

5.5.4 Resultados de la medición de la impedancia para la variedad ‘Festival’ y su relación con el “grado de madurez”

Los valores de las medias aritméticas; las desviaciones estándar; y entre paréntesis los mínimos y máximos obtenidos durante la medición de la Z^* en fresas de la variedad ‘Festival’, para cada uno de los grupos clasificados en los dos diferentes intervalos de tamaño (B y C) se muestran en la Tabla 5-30. Como se puede observar en el caso de la variable Rs, el análisis de la varianza muestra diferencias estadísticamente significativas entre los grupos $6B_F$ y $2B_F$, pertenecientes al intervalo de tamaño B. Esta misma diferencia se observa entre los grupos $6C_F$ y $2C_F$. Los valores de Rs tienden a disminuir conforme madura el fruto. Para los grupos $6B_F$, $4B_F$ y $2B_F$ se obtuvieron valores de Rs de 107,8 Ω , 118,1 Ω y 131,2 Ω , respectivamente, y para $6C_F$, $4C_F$ y $2C_F$ de 111,9 Ω , 114,6 Ω y 127,3 Ω .

Tabla 5-30.
Valores medios de las variables de impedancia para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C.

Grupo ¹	Variables de impedancia ²			
	Rs (Ω)	CPE-T (F)	CPE-P	Rp (Ω)
6B _F	x = 107,80 σ = 16,29 a (75,18 – 136,00)	x = 1,53E-07 σ = 3,54E-08 a (1,01E-07 – 2,75 E-07)	x = 0,754 σ = 0,038 ab (0,705 – 0,861)	x = 5388,60 σ = 1051,00 a (3632,00 – 7990,00)
4B _F	x = 118,10 σ = 32,76 ab (71,61 – 184,90)	x = 1,47E-07 σ = 7,24E-08 a (4,91E-08 – 3,20E-07)	x = 0,769 σ = 0,012 a (0,730 – 0,774)	x = 5145,80 σ = 1565,00 a (3377,00 – 9239,00)
2B _F	x = 131,20 σ = 21,96 b (94,50 – 205,90)	x = 1,65E-07 σ = 1,49E-08 a (1,49E-09 – 3,45E-7)	x = 0,745 σ = 0,028 b (0,701 – 0,798)	x = 5356,10 σ = 746,00 a (4026,00 – 7091,00)
6C _F	x = 111,90 σ = 36,56 a (60,25 – 242,80)	x = 1,69E-07 σ = 1,06E-08 a (5,29E-08 – 1,96E-07)	x = 0,755 σ = 0,016 a (0,74 – 0,80)	x = 4904,40 σ = 1015,10 b (3307,00 – 12293,00)
4C _F	x = 114,60 σ = 33,59 ab (61,51 – 209,10)	x = 1,94E-07 σ = 1,74E-08 a (6,87E-08 – 2,67E-07)	x = 0,755 σ = 0,041 a (0,66 – 0,84)	x = 5583,08 σ = 1406,70 ab (2698,00 – 10258,00)
2C _F	x = 127,30 σ = 38,46 b (79,02 – 203,30)	x = 1,29E-07 σ = 6,59E-08 a (6,32E-08 – 2,33E-07)	x = 0,769 σ = 0,022 a (0,70 – 0,79)	x = 6339,64 σ = 2248,30 a (3700,00 – 7999,00)

¹ El valor numérico indica el nivel de "grado de madurez" y la letra el tamaño según la NOM.

² Valores mínimo y máximo entre paréntesis.

Subíndices con misma letra indica que no hay diferencias significativas entre los grupos.

En la Figuras 5-31, 5-32, 5-33 y 5-34 se muestra el comportamiento de los valores presentados en la Tabla 5-30. A diferencia de los valores obtenidos para la variedad 'Sweet charlie', en este caso es observable una clara disminución de Rs conforme madura el fruto. Este comportamiento posiblemente se deba a que en la variedad 'Festival' se utilizaron niveles de "grado de madurez" con una mayor diferencia.

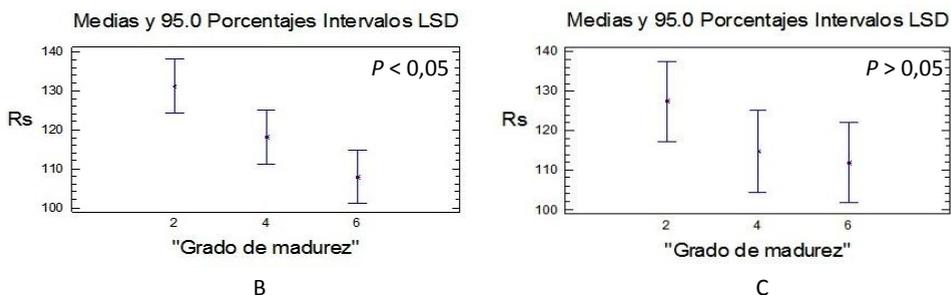


Figura 5-31. Gráficas del comportamiento de los valores de Rs (Ω) para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C, en los tres diferentes "grados de madurez".

En el caso de las variables CPE-T y CPE-P la prueba de Fisher (LSD) no muestra diferencias estadísticamente significativas entre los niveles de "grado de madurez".

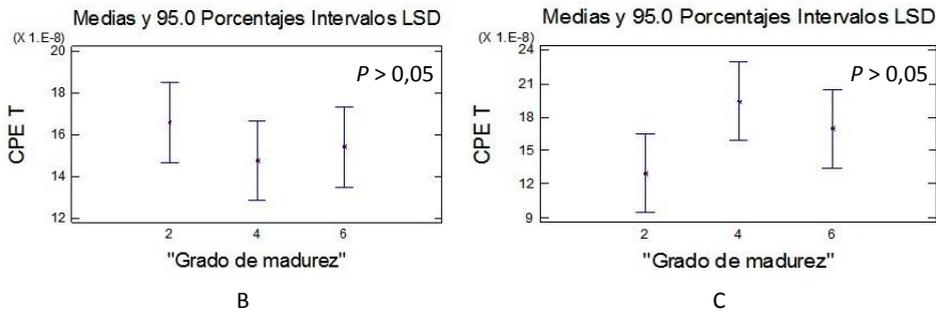


Figura 5-32. Gráficas del comportamiento de los valores de CPE-T (F) para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C, en los tres diferentes "grados de madurez".

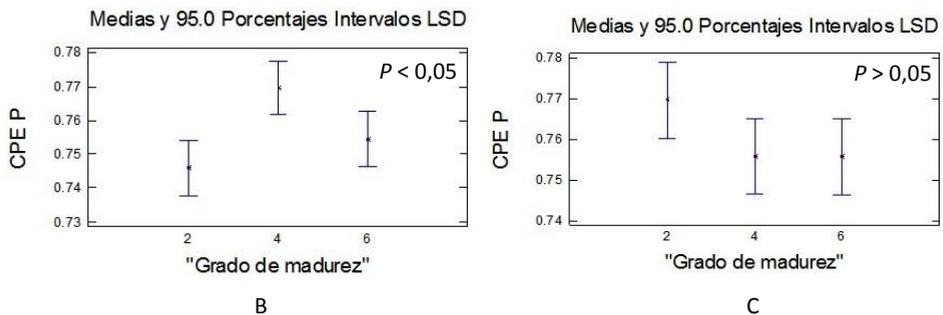


Figura 5-33. Gráficas del comportamiento de los valores de CPE-P para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C, en los tres diferentes "grados de madurez".

En el caso de la variable de impedancia R_p , la cual como se mencionó está relacionada con la resistencia del medio extracelular, presente para los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño C una disminución conforme madura el fruto. La prueba LSD muestra un valor de $P = 0,05$ para un nivel de confianza del 95 %.

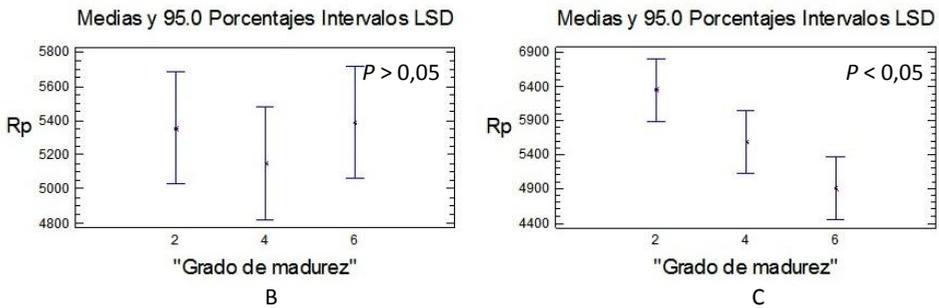


Figura 5-34. Gráficas del comportamiento de los valores de Rp (Ω) para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C, en los tres diferentes "grados de madurez".

A partir de la prueba del análisis discriminante, en la Tabla 5-31 se muestran los porcentajes de fresas clasificadas correctamente según las variables de impedancia para cada uno de los grupos pertenecientes al intervalo de tamaño B. Como se puede observar el 73,33 %, de un total de 75 individuos, fue clasificado correctamente. Para el grupo con "grado de madurez" 6 el 80 % de 25 individuos fueron correctamente clasificados mientras que para el grupo con "grado de madurez" 4 fue de 56 % y para 2 de 76 %.

Tabla 5-31.

Resultados del análisis discriminante de los "grados de madurez" según las variables de impedancia para fresas de la variedad 'Festival', tamaño B.

Actual "grado de madurez"	Número de individuos	Pronosticados "grado de madurez"		
		Porcentaje de casos correctamente clasificados: 73,33 %		
		2	4	6
2	25	19 (76,00 %)	6 (24,00 %)	0 (0,00 %)
4	25	5 (20,00 %)	14 (56,00 %)	6 (24,00 %)
6	25	1 (4,00 %)	2 (8,00 %)	22 (88,00 %)

La primera función estandarizada con un valor de $P < 0,05$, que se muestra a continuación, discrimina principalmente a partir de la variable Rs.

$$-1,22524(\text{Rs}) - 0,155771 (\text{CPE T}) + 0,754331(\text{CPE P}) + 0,583605(\text{Rp}) \quad (36)$$

Las funciones utilizadas para clasificar las observaciones en cada uno de los 3 niveles de “grado de madurez” se muestran en la Tabla 5-32. Estas funciones, como se ha venido mencionando, se usan para predecir a que nivel de “grado de madurez” pertenecen las nuevas observaciones.

Tabla 5-32.

Funciones de clasificación para cada uno de los tres “grados de madurez” utilizando las variables de impedancia de fresas de la variedad ‘Festival’, tamaño B.

“Grado de madurez”	Función de clasificación
2	$-591,156 - 0,31402(\text{Rs}) + 3,55318\text{E}08(\text{CPE-T}) + 1453,41(\text{CPE.P}) + 0,0146171(\text{Rp})$
4	$-620,844 - 0,366098(\text{Rs}) + 3,54492\text{E}08(\text{CPE-T}) + 1498,24(\text{CPE.P}) + 0,0150623(\text{Rp})$
6	$-608,275 - 0,390241(\text{Rs}) + 3,50865\text{E}08(\text{CPE-T}) + 1486,51(\text{CPE.P}) + 0,0154279(\text{Rp})$

En la Tabla 5-33 se muestran los resultados obtenidos de la prueba de análisis discriminante para los grupos de fresas de la variedad ‘Festival’, tamaño C. El 46,67 %, de un total de 75 individuos, corresponde a los casos correctamente clasificados. Siendo, hasta el momento el porcentaje más bajo obtenido. Esto es debido a que los individuos del grupo con “grado de madurez” 2, perteneciente al intervalo de tamaño C, fueron en su totalidad clasificados incorrectamente ya que como se observa el 100 % de los casos fueron discriminados como: “grado de madurez” 4. En el caso de los grupos con “grado de madurez” 4 y 6 se obtuvieron porcentajes de casos correctamente clasificados de 64 y 76, respectivamente.

En este caso ninguna de las dos funciones discriminantes tiene un valor de P inferior a 0.05, así que ninguna es estadísticamente significativa al 95% de nivel de confianza.

Tabla 5-33.

Resultados del análisis discriminante de los “*grados de madurez*” según las variables de impedancia para fresas de la variedad ‘Festival’, tamaño C.

Actual “ <i>grado de madurez</i> ”	Número de individuos	Pronosticados “ <i>grado de madurez</i> ”		
		Porcentaje de casos correctamente clasificados: 46,67 %		
		2	4	6
2	25	0 (0,00 %)	25 (100,00 %)	0 (0,00 %)
4	25	0 (0,00 %)	16 (64,00 %)	9 (36,00 %)
6	25	0 (0,00 %)	6 (24,00 %)	19 (76,00 %)

5.5.5 Resultados de la medición de la impedancia para la variedad ‘Camino real’ y su relación con el “*grado de madurez*”

En la Tabla 5-34 se muestran los valores de las medias aritméticas, las desviaciones estándar y entre paréntesis los mínimos y máximos obtenidos durante las mediciones de la impedancia realizados a fresas de la variedad ‘Camino real’. Para los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño B, el análisis de las varianzas muestra que para la variable R_s hay diferencias estadísticamente significativas, con valores de 164,57 Ω , 215,19 Ω y 239,09 Ω para los grupos 6B_{CR}, 4B_{CR} y 2B_{CR}, respectivamente.

En el caso de los grupos pertenecientes al intervalo de tamaño C, se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre 6C_{RC} con los grupos 4C_{CR} y 2C_{CR}. Como se puede observar en la Figura 5-37 los valores de R_s descienden conforme aumenta el “*grado de madurez*” de la fresa. Esto puede indicar que la resistencia intracelular este disminuyendo. Dicho comportamiento es observable tanto para los grupos tamaño B como C. Además, como se mencionó en el apartado 5.5.2, en comparación con las variedades ‘Sweet charlie’ y ‘Festival’, los valores de R_s , que abarcan un rango aproximado de 164 a 239 Ω para esta variedad, son mayores, lo

que probablemente indique que haya una menor movilidad o concentración de iones y una mayor concentración, resultado de la maduración, de compuestos aislantes como los azúcares.

En el caso de la variable CPE-T, la prueba ANOVA muestra una diferencia estadísticamente significativa entre 6B_{CR} con los grupos 4B_{CR} y 2B_{CR}, el comportamiento de los datos indica que conforme va madurando el fruto los valores del CPE - T van aumentando (Figura 5-36), comportamiento observado en las fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaño B. Este mismo comportamiento se puede observar en los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño C, donde hay un aumento evidente de CPE-T del “grado de madurez” 4 al 6. Este elemento de fase constante está relacionado con la estructura de las membranas celulares, en general con el estado de los tejidos y las células que lo constituyen.

Tabla 5-34.

Valores medios de las variables de impedancia para fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaños B y C.

Grupo ¹	Variables de impedancia ²			
	Rs (Ω)	CPE-T (F)	CPE-P	Rp (Ω)
6B _{CR}	x = 164,57 σ = 23,90 a (124,90 – 222,70)	x = 1,78E-07 σ = 4,64E-08 a (2,67E-07 – 9,65E-08)	x = 0,74163 σ = 0,01513 a (0,70671 – 0,76589)	x = 6205,45 σ = 1457,00 a (4049,00 – 10354,00)
4B _{CR}	x = 215,19 σ = 23,70 b (170,40 – 260,00)	x = 1,01E-07 σ = 1,88E-08 b (7,65E-08 – 1,40E-07)	x = 0,80107 σ = 0,01234 b (0,77344 – 0,82162)	x = 3944,65 σ = 669,40 b (3018,00 – 5119,00)
2B _{CR}	x = 239,09 σ = 17,70 c (195,30 – 268,20)	x = 9,03E-08 σ = 1,26E-08 b (6,66E-08 – 1,21E-08)	x = 0,80287 σ = 0,01040 b (0,78205 – 0,83037)	x = 4321,70 σ = 583,00 b (3415,00 – 5273,00)
6C _{CR}	x = 175,20 σ = 15,80 a (146,90 – 217,60)	x = 1,67E-07 σ = 2,80E-08 a (1,18E-07 – 2,36E-07)	x = 0,74060 σ = 0,01252 a (0,71554 – 0,76237)	x = 5636,20 σ = 859,40 a (4348,00 – 7653,00)
4C _{CR}	x = 224,50 σ = 22,60 b (192,00 – 271,30)	x = 9,53E-08 σ = 2,13E-08 b (5,72E-08 – 1,31E-07)	x = 0,80371 σ = 0,01870 b (0,77865 – 0,84810)	x = 4196,40 σ = 707,10 b (2932,00 – 5479,00)
2C _{CR}	x = 236,80 σ = 40,00 b (163,70 – 314,20)	x = 9,05E-08 σ = 1,92E-07 ab (6,11E-08 – 1,46E-07)	x = 0,79858 σ = 0,01135 b (0,78101 – 0,82220)	x = 4383,40 σ = 992,10 b (2922,00 – 6532,00)

¹ El valor numérico indica el nivel de “grado de madurez” y la letra el tamaño según la NOM.

² Valores mínimo y máximo entre paréntesis.

Subíndices con misma letra indica que no hay diferencias significativas entre los grupos.

En el caso de la variable CPE – P se puede observar, en la Figura 5-37, que conforme aumenta el “grado de madurez” de la fresa los valores de este elemento de fase constante van disminuyendo existiendo diferencia estadística entre el grupo 6 con los grupos 4 y 2. Como se mencionó este elemento de fase constante está relacionado con el grado de homogeneidad del sistema. Si su valor es igual a 1 se considera que la muestra es homogénea. En el caso de la variedad ‘Camino real’ se observa un claro descenso, para ambos intervalos de tamaño, del nivel 4 de “grado de madurez” al 6. En general, este comportamiento presentó un porcentaje de disminución para la variedad ‘Camino real’ de 7,6 y 6,3 para los grupos clasificados dentro de los intervalos de tamaño B y C, respectivamente; para la variedad ‘Festival’ la disminución fue de 1,3 % para ambos intervalos de tamaño; y para la variedad ‘Sweet charlie’ esta disminución solo se presentó para los grupos tamaño B con un 2,3 %.

Finalmente, los valores de Rp presentan para ambos intervalos de tamaño, una diferencia estadísticamente significativa, entre el nivel de “grado de madurez” 6 con 4 y 2. En este caso la Rp, que está relacionada con la resistencia extracelular además muestra un considerable incremento del “grado de madurez” 4 al 6 (Figura 5-38).

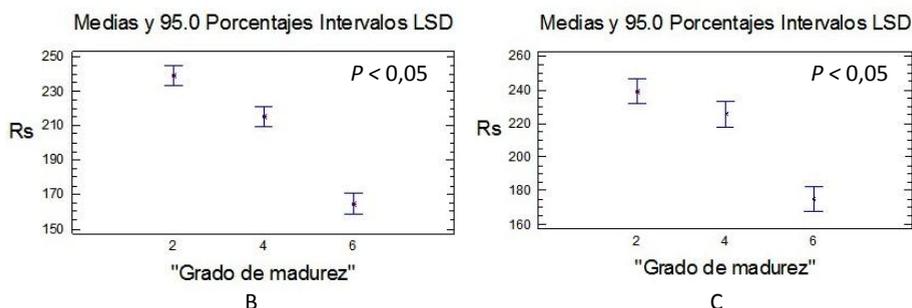


Figura 5-35. Gráficas del comportamiento de los valores de Rs (Ω) para fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaños B y C, en los tres diferentes “grados de madurez”.

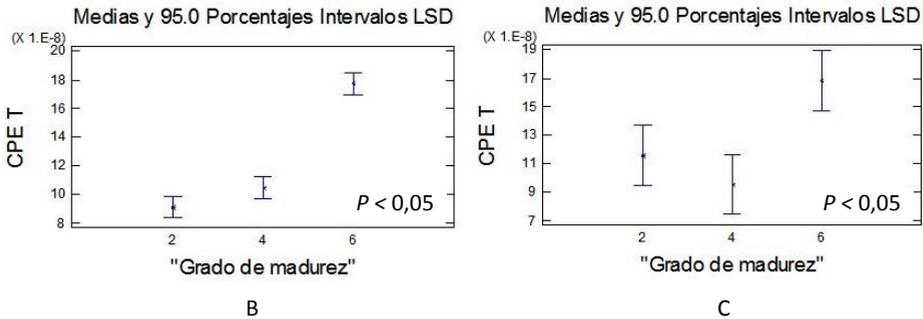


Figura 5-36. Gráficas del comportamiento de los valores de CPE-T (F) para fresas de la variedad 'Camino real', tamaños B y C, en los tres diferentes "grados de madurez".

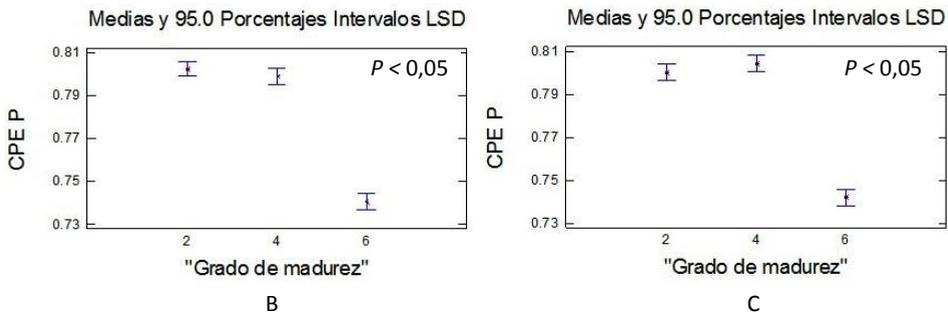


Figura 5-37. Gráficas del comportamiento de los valores de CPE - P para fresas de la variedad 'Camino real', tamaños B y C, en los tres diferentes "grados de madurez".

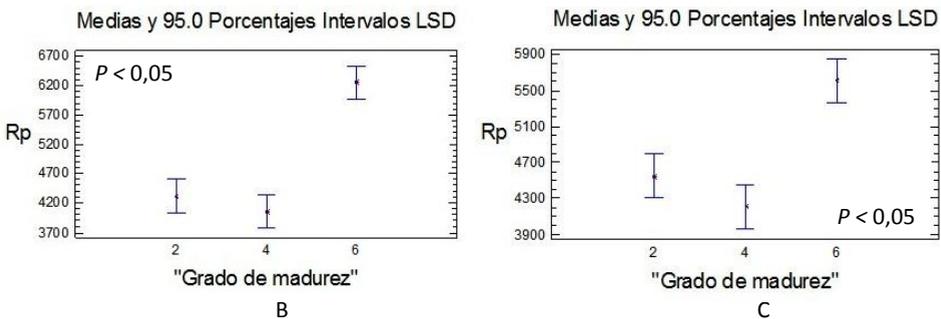


Figura 5-38. Gráficas del comportamiento de los valores de Rp (Ω) para fresas de la variedad 'Camino real', tamaños B y C, en los tres diferentes "grados de madurez".

En la Tabla 5-35 se muestra el porcentaje de casos correctamente clasificados para las tres categorías de madurez según las variables de impedancia para las fresas de la variedad ‘Camino real’ pertenecientes al intervalo de tamaño B. Los resultados obtenidos de la prueba del análisis discriminante, muestra que de los 75 individuos, el 84 % fue clasificado de manera correcta. Para el grupo con “*grado de madurez*” predeterminado 6, de 25 individuos el 100 % fue clasificado correctamente, para el “*grado de madurez*” predeterminado 4 el 80 % y para el 2 el 72 %.

Las dos funciones discriminantes generadas durante el análisis discriminante muestran valores de $P < 0,05$ por lo que ambas son estadísticamente significativas para un intervalo de confianza al 95 %.

Tabla 5-35.

Resultados del análisis discriminante de los “*grados de madurez*” según las variables de impedancia para fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaño B.

Actual “ <i>Grado de madurez</i> ”	Número de individuos	Pronosticados “ <i>grado de madurez</i> ”		
		Porcentaje de casos correctamente clasificados: 84,00 %		
		2	4	6
2	25	18 (72,00 %)	7 (28,00 %)	0 (0,00 %)
4	25	5 (20,00 %)	20 (80,00 %)	0 (0,00 %)
6	25	0 (0,00 %)	0 (0,00 %)	25 (100,00 %)

De acuerdo a la siguiente ecuación que corresponde a la primera función discriminante, las variables que mejor discriminan son R_s y CPE-P.

$$0,988554(R_s) + 0,352698(CPE-T) + 0,839193(CPE-P) - 0,595026(R_p) \quad (37)$$

Las funciones utilizadas para clasificar las observaciones en cada uno de los 3 niveles de “*grado de madurez*” se muestran en la Tabla 5-36.

Tabla 5-36.

Funciones de clasificación para cada uno de los tres “grados de madurez” utilizando las variables de impedancia de fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaño B.

“Grado de madurez”	Función de clasificación
2	$-8685,92 + 5,2165(Rs) + 9,83945E09(CPE-T) + 18431,3(CPE.P) + 0,101388(Rp)$
4	$-8607,37 - 5,13235(Rs) + 9,80014E09(CPE-T) + 18360,9(CPE.P) + 0,101566(Rp)$
6	$-8228,3 - 4,86141(Rs) + 9,72987E09(CPE-T) + 17920,7(CPE.P) + 0,105667(Rp)$

En el caso de los grupos pertenecientes al intervalo de tamaño C (Tabla 5-37) el 82,67 % de 75 individuos fue clasificado correctamente.

Para las fresas con “grado de madurez” 6 el 100 % de 25 muestras fueron clasificadas correctamente, para el nivel 4 el 80 % y para el 2 el 68 %. Estos porcentajes, como se mencionó, son considerablemente alentadores para ser pruebas preliminares.

Tabla 5-37.

Resultados del análisis discriminante de los “grados de madurez” según las variables de impedancia para fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaño C.

Actual “Grado de madurez”	Número de individuos	Pronosticados “grado de madurez”		
		Porcentaje de casos correctamente clasificados: 82,67 %		
		2	4	6
2	25	17 (68,00 %)	8 (32,00 %)	0 (0,00 %)
4	25	5 (20,00 %)	20 (80,00 %)	0 (0,00 %)
6	25	0 (0,00 %)	0 (0,00 %)	25 (100,00 %)

Para estos valores la primera función tiene un valor $P < 0,05$ por lo que es estadísticamente significativa para un intervalo de confianza del 95 %. En la siguiente función discriminante, CPE-P Y Rs son las variables que mejor discriminan.

$$0,710356(Rs) + 0,207613(CPE-T) + 0,719755(CPE-P) - 0,567153(Rp) \quad (38)$$

Las funciones utilizadas para clasificar las observaciones en cada uno de los 3 niveles de “grado de madurez” se muestran en la Tabla 5-38.

Tabla 5-38.

Funciones de clasificación para cada uno de los tres “grados de madurez” utilizando las variables de impedancia de fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaño C.

“Grado de madurez”	Función de clasificación
2	$-2028,23 - 0,0905452(Rs) + 3,74351E08(CPE-T) + 4905,37(CPE.P) + 0,0236201(Rp)$
4	$-2036,02 - 0,118039(Rs) + 3,67729E08(CPE-T) + 4924,46(CPE.P) + 0,0235195(Rp)$
6	$-1806,15 - 0,24871(Rs) + 3,56381E08(CPE-T) + 4640,34(CPE.P) + 0,0270785(Rp)$

En general los resultados obtenidos de las mediciones de impedancia muestran que **los valores de Rs, variable relacionada con la resistencia intracelular, disminuyen conforme el fruto va madurando. Los valores más altos de esta variable, corresponden a las fresas de la variedad ‘Camino real’, seguidos de las ‘Festival’ y ‘Sweet charlie’.** Esta última, como se observó, fue la que obtuvo los valores más bajos durante los ensayos de la medida destructiva de la firmeza. En el caso de CPE T, variable relacionada con la estructura de las membranas celulares (bicapa lipídica), se observó un ascenso de los valores conforme madura el fruto, siendo más evidente para los grupos tamaño B. En el caso de la variable CPE – P, la cual está relacionada con el grado de homogeneidad de la muestra, presentó una **disminución conforme madura el fruto, siendo mayor para la variedad ‘Camino real’.** Y finalmente, Rp, variable relacionada con la resistencia extracelular, de manera general aumentó conforme madura el fruto.

En la Tabla 5-39 se muestra un resumen de los porcentajes de casos correctamente clasificados, según las categorías de “*grado de madurez*” así como de las variables que tuvieron una mayor ponderación en la primera función discriminante, comparando los resultados presentados en los apartados 5.3 y 5.5. En general, podemos confirmar que los resultados de clasificación en función del “*grado de madurez*” mediante análisis discriminante usando las variables de color L*, a* y b*, presentan porcentajes de frutos correctamente clasificados mayores que utilizando las variables de impedancia.

En el caso de las variables de impedancia, la variedad ‘Camino real’ presentó porcentajes altos de casos correctamente clasificados, resultados muy alentadores para ser pruebas preliminares. Los porcentajes fueron de 84 y 82,67, para los grupos clasificados dentro de los intervalos de tamaño B y C, respectivamente. En el caso de la variedad ‘Sweet charlie’ los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño C tuvieron un porcentaje de casos correctamente clasificados de 77,58 y para la variedad ‘Festival’ de 73, 33 % en los grupos dentro del intervalo de tamaño B.

En general, la variedad ‘Sweet charlie’ fue la que presentó los porcentajes más bajos de casos correctamente clasificados tanto para las variables de color como de impedancia.

Las variables de color que presentaron una mayor magnitud en las funciones de discriminación y que son las que se están utilizando para diferenciar entre los grupos clasificados según su “*grado de madurez*” fueron L* (luminosidad) y a*(nivel de verde y rojo). Los valores de la variable de color L* tuvieron una mejor

capacidad de discriminación en los grupos de las variedades ‘Sweet charlie’ y ‘Camino real’ y no en ‘Festival’.

Así mismo, estos resultados muestran como **las variables de impedancia, especialmente CPE-P, relacionada con el grado de homogeneidad y Rs, relacionada con la resistencia intracelular, son las que mejor discriminan las categorías de “grados de madurez”**. En el caso de la variedad ‘Sweet charlie’, la variable de impedancia Rs no es capaz de discriminar en las categorías de “grado de madurez”.

Tabla 5-39.

Resumen de la prueba de análisis discriminante en las categorías de “grado de madurez” según las variables de color e impedancia para las tres variedades de fresa.

Variedad	Intervalo de Tamaño	% de casos correctamente clasificados		Variables que mejor discriminan	
		Color	Impedancia	Color	Impedancia
‘Sweet charlie’	B	70,00	58,33	L*	CPE-P
	C	63,79	77,58	L*	CPE-P
‘Festival’	B	100,00	73,33	a*	Rs
	C	97,33	46,67	a*	p > 0.05
‘Camino real’	B	100,00	84,00	L*	Rs
	C	100,00	82,67	L*	CPE-P y Rs

5.6 La firmeza destructiva y su relación con las variables de impedancia y color.

La prueba de regresión lineal múltiple (RLM) es un método estadístico que estima la relación que se produce entre una variable dependiente (variable explicada) y un conjunto de variables independientes (variables explicativas). Con los valores obtenidos durante las mediciones de color e impedancia, y mediante el uso de la prueba de RLM, se obtuvieron las expresiones matemáticas que permiten determinar la firmeza (variable explicada) de la fresa a partir de las tres variables de color L^* , a^* y b^* y en el caso de la impedancia solo de Rs y $CPE-P$ que fueron determinantes durante el análisis discriminante. Para estos ambos casos los modelos que se desean construir son:

$$\text{Firmeza}_{(\text{color})} = \beta_0 + \beta_1 (L^*) + \beta_2 (a^*) + \beta_3 (b^*) \quad (39)$$

$$\text{Firmeza}_{(\text{impedancia})} = \beta_0 + \beta_1 (Rs) + \beta_2 (CPE-P) \quad (40)$$

A continuación se presentan los resultados de la prueba de RLM para cada una de las variedades en estudio.

5.6.1 La firmeza y su relación con impedancia y color para la variedad 'Sweet charlie'

En la Tabla 5-40 se muestran las ecuaciones del modelo ajustado para la variable explicada firmeza y las variables explicativas de color e impedancia de las poblaciones de fresas tamaños B y C de la variedad 'Sweet charlie'. Asimismo, se muestran los valores de P y del coeficiente de determinación R^2 . Como se observa, para las ecuaciones del modelo ajustado que tienen las variables explicativas L^* , a^*

y b^* , el valor de P es menor a 0,01 por lo que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99 %, sin embargo los valores de R^2 para las poblaciones tamaño B y C, son de 0,4258 y 0,4254, respectivamente, lo que nos indica que los modelos explican la firmeza en un porcentaje del 42 %.

Por otro lado, se muestran las ecuaciones del modelo ajustado para la misma variable explicada, firmeza (N), utilizando las variables explicativas de impedancia (Rs y CPE-P) para poblaciones de fresas tamaños B y C de la variedad 'Sweet charlie'. En el caso de la ecuación obtenida a partir de la prueba de RLM realizada a los datos pertenecientes a las fresas con tamaño B el valor de P es menor a 0,01 por lo que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables para un intervalo de confianza del 99%.

En el caso de la ecuación para las fresas tamaño C el valor de P es mayor a 0,10 por lo que no hay una relación significativa. Para este caso, realizando la prueba RLM y utilizando las 4 variables explicativas de impedancia (Rs, CPE-T, CPE-P y Rp) se obtuvo un valor de P inferior a 0,10, por lo que en este caso las cuatro variables tienen una relación estadísticamente significativa para un intervalo de confianza del 90%, por lo que podemos decir que las cuatro variables están relacionadas.

Tabla 5-40.

Ecuaciones predictivas de la firmeza a partir de las variables de color e impedancia para fresas de la variedad 'Sweet charlie', tamaños B y C.

Variables explicativas	Población	Ecuación del modelo ajustado	Valor de p	R ²
L*, a* y b*	Tamaño B	Firmeza = 12,9541 – 0,0135404(L*) – 0,181348(a*) – 0,06924(b*)	< 0,01 (99%)	0,4258
L*, a* y b*	Tamaño C	Firmeza = 4,71414 + 0,03891(L*) – 0,0788452(a*) + 0,000453629(b*)	< 0,01 (99%)	0,4254
Rs y CPE-P	Tamaño B	Firmeza = -39,4443 – 0,0089015(Rs) + 58,5474(CPE-P)	< 0,01 (99%)	0,2650
Rs y CPE-P	Tamaño C	Firmeza = - 8,58297 – 0,00286138(Rs) + 16,7963(CPE-P)	> 0,10	0,0000

5.6.2 La firmeza y su relación con impedancia y color para la variedad 'Festival'

En la Tabla 5-41 se muestran las ecuaciones del modelo ajustado para la variable explicada firmeza (N), utilizando las tres variables explicativas de color para las poblaciones de fresas tamaños B y C de la variedad 'Festival'. Como lo muestra el valor de P ($< 0,01$) en ambas ecuaciones, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables para un intervalo de confianza del 99 %, sin embargo los valores de R^2 no indican que se pueda predecir la variable explicada firmeza. En el caso de las variables de impedancia, se muestran las ecuaciones del modelo ajustado para determinar la firmeza (N), utilizando Rs y CPE-P, para poblaciones de fresas tamaños B y C de la variedad 'Festival'. Como se observa las variables de la ecuación del modelo para las fresas tamaño B, tienen una relación estadísticamente significativa para un intervalo de confianza del 90 % ($P < 0,10$).

Tabla 5-41.

Ecuaciones predictivas de la firmeza a partir de las variables de color e impedancia para fresas de la variedad 'Festival', tamaños B y C.

Variabes explicativas	Población	Ecuación del modelo ajustado	Valor de p	R ²
L*, a* y b*	Tamaño B	Firmeza = 17,9118 – 0,0761105(L*) - 0,397124(a*) + 0,21956(b*)	< 0,01 (99%)	0,5729
L*, a* y b*	Tamaño C	Firmeza = 27,8315 – 0,0279725(L*) – 0,612342(a*) + 0,158156(b*)	<0,01 (99%)	0,3579
Rs y CPE-P	Tamaño B	Firmeza = 9,39867 + 0,0232198(Rs) – 6,88008(CPE-P)	< 0,10 (90%)	0,0458
Rs y CPE-P	Tamaño C	Firmeza = -4,7723 + 0,00224004(Rs) + 15,0773(CPE-P)	> 0,10 (90%)	0,0347

5.6.3 La firmeza y su relación con impedancia y color para la variedad 'Camino real'

En la Tabla 5-42 se muestran las ecuaciones del modelo ajustado para la variable explicada firmeza (N), utilizando las variables explicativas de color para poblaciones de fresas tamaños B y C de la variedad 'Camino real'.

En esta misma Tabla, se muestran las ecuaciones del modelo ajustado para la misma variable explicada firmeza (N), utilizando las variables explicativas de impedancia para poblaciones de fresas tamaños B y C. Como se observa para ambas ecuaciones los valores de *P* son inferiores a 0,01 por lo que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables de impedancia para un intervalo de confianza del 99 %. En el caso del modelo matemático para las fresas tamaño B el valor de R² muestra un valor igual a 0,6.

Tabla 5-42.

Ecuaciones predictivas de la firmeza a partir de las variables de color e impedancia para fresas de la variedad 'Camino real', tamaños B y C.

Variables explicativas	Población	Ecuación del modelo ajustado	Valor de p	R ²
L*, a* y b*	Tamaño B	Firmeza = 8,5249 + 0,0937989(L*) - 0,278977(a*) + 0,103447(b*)	< 0,01 (99%)	0,6733
L*, a* y b*	Tamaño C	Firmeza = 1,26524 + 0,134067(L*) - 0,0607294 (a*) + 0,0702672(b*)	< 0,01 (99%)	0,6186
Rs y CPE-P	Tamaño B	Firmeza = - 30,0114 + 0,0221766(Rs) + 39,865(CPE-P)	<0,01 (99%)	0,5939
Rs y CPE-P	Tamaño C	Firmeza = -27,6925 + 0,0117214(Rs) + 39,9241(CPE-P)	<0,01 (99%)	0,4319

En el caso de los modelos que tienen como variables explicativas a L*, a* y b* los valores de R² fueron de 0,59 y 0,43 para las fresas tamaños B y C, respectivamente.

Para todas las variedades y todos los tamaños (a excepción de la variedad 'Camino real' tamaño C) se ha demostrado la relación significativa de la firmeza destructiva con las variables de color L*, a* y b*. Sin embargo, no ha sido posible obtener un modelo para explicar la firmeza destructiva en función de las variables de color con suficiente precisión (R²<0,5). Generalmente, las variables de color L*, a* y b* se han utilizado de manera independiente, para relacionarlas con índices de calidad como lo son el grado de madurez y la firmeza, encontrando correlaciones significativas ya se con L*, a* o b* (Byrne *et al.*, 1991; Yommi *et al.*, 2012).

Para todas las variedades y el tamaño menor (B) (y en el caso de la variedad 'Camino real' también el tamaño C) se ha demostrado la relación significativa de la firmeza destructiva con las variables de impedancia Rs y CPE-P. **Estos resultados**

muestran la relación de la firmeza de la fresa con las variables de impedancia, R_s , relacionada con la resistencia intracelular, y CPE-P, relacionada con la homogeneidad del tejido.

Sin embargo, no ha sido posible obtener un modelo para explicar la firmeza destructiva en función de las variables de impedancia con suficiente precisión ($R^2 < 0,6$). En el caso de la variedad 'Camino real' tamaño B, la firmeza es explicada mediante las variables de impedancia con un R^2 de 0,6.

CAPÍTULO 6

Conclusiones

6.1 Conclusiones

I. Diseño, construcción y evaluación del dispositivo para medir la impedancia bio-eléctrica de tres lotes de distintas variedades de fresa.

Se ha diseñado y construido un dispositivo que conectado a un analizador de impedancia mide de manera no destructiva la impedancia bio-eléctrica de la fresa (*Fragaria x ananassa* Duch). El dispositivo es de bajo costo, de fácil manejo, con una repetibilidad confiable ($r = 0,85$) y adaptable a diferentes diámetros ecuatoriales del fruto.

Con el dispositivo diseñado y el procedimiento definido se obtuvieron las curvas de impedancia imaginaria, Z'' / impedancia real, Z' , a partir de las cuales y ajustándolas al modelo de Cole definido, se lograron obtener los valores de las variables eléctricas R_s (relacionada con la resistencia de la región intracelular), $CPE - T$ (relacionada con la estructura de las membranas celulares), $CPE - P$ (relacionada con el grado de homogeneidad del fruto) y R_p (relacionada con la resistencia de la región extracelular).

II. Determinación de la relación del “grado de madurez” subjetivo de tres lotes de distintas variedades de fresa con las medidas obtenidas mediante técnicas convencionales (coordenadas de color L^* , a^* , b^* y firmeza destructiva).

Se ha comprobado, cómo las **variables de color** L^* , a^* y b^* están significativamente relacionadas con las categorías de madurez (“grado de madurez”) establecidas de forma subjetiva en función del color externo, en base a la norma mexicana NMX-

FF-062-SCFI-2002. Se han podido establecer las funciones de clasificación, mediante análisis discriminante, de las fresas de las tres variedades estudiadas ('Sweet charlie', 'Festival' y 'Camino real') en los grados de madurez establecidos según la norma. En el caso de la variedad 'Sweet charlie', con categorías de color preestablecidas visualmente muy próximas ("*grados de madurez*" 4, 5 y 6), se encontraron porcentajes de 70% y de 64% de frutos bien clasificados, para los tamaños B y C, respectivamente. En el caso de las variedades 'Festival' y 'Camino real', con categorías de color preestablecidas visualmente más diferentes ("*grados de madurez*" 2, 4 y 6) se encontraron porcentajes altos de observaciones correctamente clasificadas, mayores de 90% en todos los casos.

Se ha comprobado como la **firmeza destructiva** está significativamente relacionada con las categorías de "*grado de madurez*" pre-establecidas de forma subjetiva en función del color externo. La firmeza destructiva disminuye con el "*grado de madurez*". La variedad 'Camino real' presentó el mayor porcentaje de pérdida de firmeza (64 %, para los grupos clasificados dentro del intervalo de tamaño B y del 58 % para el C). Las fresas de la variedad 'Festival', que presentaron los valores más altos de firmeza, tuvieron una pérdida de 45 % para el tamaño B y de 49 % para el tamaño C. Las fresas de la variedad 'Sweet charlie' presentaron porcentajes de pérdida de firmeza de 34 % para el tamaño B y de 35 % para el tamaño C.

III. Determinación del “grado de madurez” subjetivo de tres lotes de distintas variedades de fresa en función de las variables de impedancia bio-eléctrica.

Los valores de la variable de impedancia **Rs**, relacionada con la resistencia intracelular, disminuyen conforme madura el fruto. Los valores más altos de esta variable, corresponden a las fresas de la variedad ‘Camino real’, seguidos de las ‘Festival’ y ‘Sweet charlie’. Esta última fue la variedad que presentó valores de firmeza destructiva más baja. La variable de impedancia **CPE T**, relacionada con la estructura de las membranas celulares (bicapa lipídica), incrementa conforme madura el fruto, siendo más evidente para los grupos tamaño B. La variable de impedancia **CPE – P**, relacionada con el grado de homogeneidad del tejido, disminuye conforme madura el fruto, siendo mayor para la variedad ‘Camino real’. La variable de impedancia **Rp**, relacionada con la resistencia extracelular, de manera general aumenta conforme madura el fruto.

Se han establecido modelos de clasificación de las fresas en función del “grado de madurez” mediante las variables de impedancia **Rs**, relacionada con la resistencia intracelular, y **CPE-P**, relacionada con la homogeneidad del tejido.

La variedad ‘Camino real’ presentó porcentajes altos de casos correctamente clasificados, 84% y 83%, para los grupos los de tamaño B y C, respectivamente. En el caso de la variedad ‘Sweet charlie’ los grupos de tamaño C tuvieron un porcentaje de casos correctamente clasificados de 78% y para la variedad ‘Festival’ de 73% en los grupos de tamaño B.

En general, podemos confirmar que los resultados de clasificación en función del “*grado de madurez*” mediante análisis discriminante usando las variables de color L^* , a^* y b^* , presentaron porcentajes de frutos correctamente clasificados mayores que utilizando las variables de impedancia.

IV. Estimación de la firmeza destructiva de tres lotes de distintas variedades de fresa en función de las variables de color y de impedancia bio-eléctrica.

Se ha comprobado la relación significativa de la firmeza destructiva con las variables de color L^* , a^* y b , en todas las variedades y todos los tamaños (a excepción de la variedad ‘Camino real’ tamaño C). Sin embargo, no ha sido posible establecer un modelo con suficiente precisión para poder estimar la firmeza destructiva en función de las variables de color.

Se ha demostrado la relación de la firmeza destructiva de la fresa con las variables de impedancia, R_s , relacionada con la resistencia intracelular, y CPE-P, relacionada con la homogeneidad del tejido. Se confirma una relación significativa de la firmeza destructiva con las variables de impedancia R_s y/o CPE-P, en todas las variedades y tamaño menor (B), y en el caso de la variedad ‘Camino real’ también el tamaño C.

Se establecido un modelo para explicar la firmeza destructiva con las variables de impedancia R_s y CPE-P, de las fresas de la variedad ‘Camino real’ tamaño C ($R^2 > 0,6$).

6.2 Propuestas para trabajos posteriores

El estudio de la medición de la impedancia bio-eléctrica en materiales biológicos como los frutos, tiene las siguientes ventajas: 1) Puede ser una técnica no destructiva de bajo costo, 2) mide de manera rápida y global las propiedades eléctricas que están relacionadas con los procesos fisiológicos y con la estructura del tejido y 3) puede medir los cambios debido a factores externos como son el daño mecánico y la temperatura, entre otros. En este sentido y por el interés en continuar trabajando en el campo relacionado con la impedancia bio – eléctrica aplicada a vegetales y a frutos se considera importante en futuros trabajos considerar los siguientes aspectos:

1. Diferenciar claramente a través de mediciones objetivas (medidas espectrales, °Brix, pH, entre otros) las características de los grupos en estudio.
2. Estudiar la influencia en la medida de la impedancia de otros factores como son la temperatura y el contenido en humedad.
3. Realizar mediciones que permitan conocer el contenido de iones metálicos y movilidad de electrolitos.
4. Realizar mediciones que permitan conocer la estructura anatómica de las muestras en estudio.
5. Continuar con las mediciones de la impedancia utilizando el prototipo diseñado en este trabajo, utilizando electrodos de diferente material y variar las distancias interelectrodos.
6. Estudiar la posibilidad de aplicar otros modelos de circuitos equivalentes que mejor se relacionen con la estructura de los materiales biológicos.
7. Llevar a cabo estudios sobre el comportamiento de las propiedades eléctricas de materiales biológicos durante su almacenamiento poscosecha.

CAPÍTULO 7

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

Abbott, J. A. (1999). Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 15(3), 207-225.

Abbott, J. A., Affeldt, H. A., Liljedahl, L. A. (1992). Firmness measurement of stored 'Delicious' apples by sensory methods, Magness – Taylor, and sonic transmission. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117 (4), 590-595.

Abbott, J. A., Harker, R. F. (2004). Texture. In "The commercial storage of fruits, vegetables, and florist and nursery stocks". *Agriculture Handbook*, 66, USDA, ARS.

Alcántara, M. L. (2009). Estimación de los daños físicos y evaluación de la calidad de la fresa durante el manejo poscosecha y el transporte simulado. (Tesis de doctorado). Universidad Politécnica de Valencia, España y Universidad de Guanajuato, México.

ASAE Standar, 1998. Compression Test of Food Materials of Convex Shape. ASAE S368.3 MAR95

Barrera, W. E., Fernández, O., Vera, E., Ortiz, C. A. (2006). Simulación de funciones de transferencia para espectroscopia de impedancia electroquímica. *Revista Colombiana de Física*, 38(3), 1331-1334.

Barreiro, P., Ruiz-Altisent, M. (1996). Propiedades mecánicas y calidad de frutos, definiciones y medidas instrumentales. *Fruticultura Profesional*, 77, 48-51.

Barreiro, P., Ruiz-Altisent, M. (2001). Instrumentación de la calidad en frutas y hortalizas secas. *Horticultura Internacional*, 29, 14-20.

Bauchot, D. A., Harker, R. F., Arnold, M. W. (2000). The use of electrical impedance spectroscopy to assess the physiological condition of kiwifruit. *Postharvest Biology and Technology*, 18, 9-18.

Benavente, J., Ramos-Barrado, J. R., Heredia, A. (1998). A study of the electrical behaviour of isolated tomato cuticular membranes and cutin by impedance spectroscopy measurements. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 140, 333-338.

Bodria, L., Fiala, M., Guidetti, R., Oberti, R. (2004). Optical techniques to estimate the ripeness of red – pigmented fruits. *Transactions of the ASAE*, 17(3), 815-830.

Bourne, C. M. (2002). *Food texture and viscosity: concept and measurement*. San Diego California, USA. Academic Press.

Bramlage, W. J. (1983). Measuring fruit firmness with a penetrometer. *Post Harvest Pomology Newsletter*, 1(3).

Brazanti, E., C. (1985). *La fresa*. Madrid, España. Mundi – Prensa.

Burkhart, L. (1943). Firmness of strawberries as measured by a penetrometer. *Plant Physiology*, 18(4), 693-698.

Butz, P., Hofmann, C., Tauscher, B. (2005). Recent developments in noninvasive techniques for fresh fruit and vegetable internal quality analysis. *Journal of Food Science*, 70(9), 131-141

Byrne, H. D., Nikolic, N. A., Burns, E. E. (1991). Variability in sugars, acids, firmness, and color characteristics of 12 peach genotypes. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 116(6), 1004-1006

Cabrera, H. F., Guerrero, A. C., Bernal, A. J. (2007). Determinación de las propiedades eléctricas en tejido sanguíneo. *Ciencia UANL*, 8(4), 510-515.

Calvo, G., Candan, A. P., Fernández, L. (2003). Firmeza en peras y manzanas: Comparación de tres presiómetros. *Rompecabezas tecnológico*, 39, 36-39.

Carballo, S., Scalone, M., Borthagaray, M. (2006). Resultados experimentales en manejo postcosecha de frutilla. Programa Nacional de Horticultura Serie de Actividades de Difusión, 443. Recuperado de www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/ad/ad_443.pdf

Casañas, R. (2003). Contribución a la caracterización dieléctrica y magnética del tejido biológico mediante métodos basados en inducción magnética. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Chen, P., Ruiz-Altisent, M., Barreiro, P. (1996). Effect of impacting mass on firmness sensing of fruits. *Transactions of the ASAE*, 39(3), 1019-1023.

Chiabrando, V., Giacalone, G., Rolle, L. (2008). Mechanical behavior and quality traits of highbush blueberry during postharvest storage. *J. Sci. Food. Agric.*, 89, 989-992. doi: 10.1002/jsfa.3544

Choi, K-H., Lee, K-J., Kim, G. (2001). Nondestructive quality evaluation technology for fruits and vegetables using near – infrared spectroscopy. National Agricultural Mechanization Research Institute (NAMRI), Rural Development Administration. Recuperado de: www.unapcaem.org/.../p80_NonDestruction.pdf

Civello, M. P., Powell, L. T. A., Sabehat, A., Bennett, B. A. (1999). An expansin gene expressed in ripening strawberry fruit. *Plant Physiology*, 121, 1273-1279.

Cole, S. K. (1972). *Membranes, ions, and impulses: a chapter of classical biophysics*. Berkeley, Los Angeles, London. University of California Press.

CONAFRE, A.C. (2007). Sistema Producto Fresa, Plan Rector. 1-35. http://conafresa.com/plan_rector.pdf

Cooke, J. R., Rand, R. H. (1973). A mathematical study of resonance in intact fruits and vegetables using a 3-media elastic sphere model. *J. Agric. Eng. Res*, 18, 141 – 157.

Cooper, T., Gargiullo, A., Retamales, J. (2005). Investigation on early softening of kiwi fruit. Proc. 5th Int. Postharvest Symp, Eds. F. Mencarelli and P. Tonutti, *Acta Hort.* 682, ISHS.

Cordenunsi, B. R., Do Nascimento, O. J. R., Genovese, M. I., Lajolo, F. M. (2002) Influence of cultivar on quality parameters and chemical composition of Strawberry fruits grown in Brazil. *J. of Agric. and Food Chem.*, 50, 2581-2586.

Cordenunsi, B. R., Do Nascimento, O. J. R., Lajolo, F. M. (2003). Physico-chemical changes related to quality of five strawberry fruit cultivars during cool-storage. *Food Chemistry*, 83, 167-173.

Crisosto, C. H. (1994). Stone fruit maturity indices: a descriptive review. *Postharvest News and information*, 5(6), 65-68.

Crouch, I., Griessel, H. (1998). Differential softening: a new way of predicting fruit maturity and storage quality in *bon chretien* pears. *Proc. VII I.S. Pear Growing. Act. Hort*, 475, 587-591.

Davie, J. I., Banks, H. N., Jeffery, B. P., Studman, J. C., Kay, P. (1996). Non-destructive measurement of kiwifruit firmness. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 24, 151-157.

De Ketelaere, B., Scott Howarth, M., Crezee, L., Lammertyn, J., Viaene, K., Bulens, I., De Baerdemaeker, J. (2006). Postharvest firmness changes as measured by acoustic and low-mass impact devices: a comparison of techniques. *Postharvest Biology and Technology* 41, 275-284.

DeLong, M. J., Prange, K. R., Harrison, A. P., McRae, B. K. (2000). Comparison of a new apple firmness penetrometer with three standard instruments. *Postharvest Biology and Technology*, 19, 201-209.

Diezma, B., Marañón, A. Ruiz-Altisent, M. Flores, L. Diez, J. (2001). Firmeza de la fruta: determinación por métodos no destructivos. *Horticultura*, 154, 1-7.

Diezma, B., Ruiz-Altisent, M. (2004). Propiedades acústicas aplicadas a la determinación de los parámetros de calidad interna de productos hortofrutícolas. *Revista de Acústica*, 35, 20-25.

Duprat, F., Grotte, M., Pietri, E., Loonis, D. (1997). The acoustic impulse response method for measuring the overall firmness of fruit. *J. Agric. Engng res.* 66, 251-259.

Espinoza, M. C. (2003). Efecto de la atmosfera modificada y controlada sola o combinada sobre la firmeza de frutos de kiwi *Actinidia deliciosa* (A. Chev) Liang & Ferguson var. *Deliciosa*, cv. Hayward. (Tesis de Licenciatura). Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile.

Freeborn, T. J., Maundy, B., Elwakil, A. S. (2013). Cole impedance extractions from the step – response of a current excited fruit sample. *Computers and Electronics in Agriculture* 98, 100-108

Funebo, T., Ohlsson, T. (1998). Dielectric properties of fruits and vegetables as a function of temperatura and moisture content. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 34(1), 42-54.

García- Ramos, F. J., Valero, C., Homer, I., Ortiz-Cañavate, J., Ruiz-Altisent, M. (2005). Non-destructive fruit firmness sensors: a review. *Spanish Journal of Agriculture Research*, 3(1), 61-73.

Giampieri, F., Tulipani, S., Alvarez-Suarez, J., Quiles, J. L., Mezzetti, B., Battino, M. (2012). The strawberry: composition, nutritional Quality, and impact on human health. *Nutrition*. 28, 9-19

Gil, M., Holcroft, D., Kader, A. (1997). Changes in strawberry anthocyanins and other polyphenols in response to carbon dioxide treatments. *J. Agric. Food Chem*, 45, 1662-1667.

González-Araiza. J. R. (1998). Evaluación de las propiedades mecánicas de cuatro variedades de tuna (*Opuntia* ssp.) (Tesis de licenciatura). Universidad de Guanajuato

González, R. C., Woods, R. E. (1996). Tratamiento digital de imágenes. Addison-Wesley/Díaz de Santos. Massachusetts, E.U.A.

Grimnes, S., Grottem, M. O. (2000). Bioimpedance and bioelectricity basics. San Diego, California. Academic Press.

Harker, F. R., Elgar, H. J., Watkins, C. B., Jackson, P. J., Hallet, I. C. (2000). Physical and mechanical changes in strawberry fruit after high carbon dioxide treatments. *Postharvest Biology and Technology*, 19, 139-146.

Harker, F. R., Forbes, S. K. 1997. Ripening and development on chilling injury in persimmon fruit: an electrical impedance study. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*. 25, 149-157.

Harker, F. R., Maindonald, J.H. 1994. Ripening of nectarine fruit: Changes in the cell wall, vacuole, and membranes detected using electrical impedance measurements. *Plant Physiol.* 106:165–171.

Harper, G. C. D. (1994). Some comments on the repeatability of measurements. *Ringing & Migration*, 15:2, 84.90

Hernández, M. P., Almenar, E., Del Valle, V., Velez, D., Gavara, R. (2008). Effect of chitosan coating combined with postharvest calcium treatment on strawberry (*Fragaria x ananassa*) quality during refrigerated storage. *Food Chemistry*, 110, 428-435.

Hernández, G. A., Wang, J., García, P. A., (2004). Impulse response of pear fruit and its relation to Magness – Taylor firmness during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 35(2), 209-215.

Herrero, A. (2010). Técnicas de imagen espectral para la supervisión y predicción de la madurez melocotón en recolección y postrecolección. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. España.

Holcroft, D. M., Kader, A. A. (1999). Controlled atmosphere – induced changes in pH and organic acid metabolism may affect colour of stored strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 17, 19-32.

Hopkirk, G., Maindonald, J. H., White, A. (1996). Comparison of four new devices for measuring kiwifruit firmness. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 24, 273-286.

Inaba, A., Manabe, T., Tsuji, H., Iwamoto, T. (1995). Electrical impedance analysis of tissue properties associated with ethylene induction by electric currents in cucumber (*Cucumis sativus* L) fruit. *Plant Physiol*, 107, 199-205.

Irastorza, M. R., Vericat, F., Mayosky, M. (2007). Mediciones no invasivas de propiedades dieléctricas en medios biológicos estratificados: una aproximación con identificación de sistemas. XII Reunión de trabajo en procesamiento de la información y control. Santa Cruz, Argentina.

Jackson, P. J., Harker, F. R. (2000). Apple bruise detection by electrical impedance measurement. *Postharvest Biology and Technology*. *HortScience* 35(1):104-107

Jesus, S. I., Tenreiro, M. J. A., Boaventura, C. J. (2008). Fractional electrical impedances in botanical elements. *Journal of Vibration and Control*, 14(9-10), 1389-1402.

Jiang, Y., Shina, T., Nakamura, N., Nakahara, A. (2001). Electrical conductivity evaluation of postharvest strawberry damage. *Journal of food science*, 66(9), 1392-1395.

Kader, A. A. (1991). Quality and its maintenance in relation to the postharvest physiology of strawberry. *The strawberry into the 21 St*, 145-152, Portland, Oregon. Timber press.

Kader, A. A. (1999). Fruit maturity, ripening, and quality relationships. *Acta Hort.*, 485, 203- 208.

Kader, A. A., and Cantwell, M. (2010). Produce quality rating scales and color charts. Postharvest Technology Center. UC Davis.

Kondou, H., Itou, H., Ishikawa, H., Motonaga, Y., Hashimoto, A., Kameoka, T. (1998). Colour chart for fruits of grape *Aki queen* by digital image processing. Agricultural Information Technology in Asia and Oceania by The Asian Federation for Information Technology in Agriculture, 197 – 202.

Konica Minolta. (2007). Precise color communication. Color control from perception to instrumentation.

Kuczyński, P. A. (1985). Maturity vs puncture force in predicting the varietal differences of strawberry fruits. *Zeszyty Problemoyye Nauk Rolniczych*, 304, 131-138. Recuperado de: users.ipan.lublin.pl/.../ak_ZeszProbl_1985.pdf

Lammertyn, J., Nicolai, B., Ooms, K., De Smedt, V., De Baerdemaeker, J. (1998). Non – destructive measurement of acidity, soluble solids, and firmness of ‘jonagold’ apples using NIR - spectroscopy. *Transactions of the ASAE*, 41(4), 1089-1094.

Landhal, S., González, J., Van Linden, V., De Baerdemaeker, J. (2005). The acoustic impulse-response of apples in relation to internal damage and in relation to apoplastic pH. *Proc. 5th Int. Postharvest Symp. Acta Hort.*, 682, 1403-1410.

Lefever, G., Vieuille, M. Delage, N., D’Harlingue, A., De Monteclerc, J., Bompeix, G. (2004). Characterization of cell wall enzyme activities, pectin composition, and technological criteria of Strawberry cultivars (*Fragaria x ananassa* Duch). *Food Chemistry and Toxicology*, 69(4), 221-226.

Lleó, L., Roger, J.M., Herrero-Langreo, A., Diezma-Iglesias, B. Barreiro, P. 2011. Comparison of multispectral indexes extracted from hyperspectral images for the assessment of fruit ripening. *Journal of Food Engineering*, 104(4), 612-620

Lu, R. (2001). Predicting firmness and sugar content of sweet cherries using near – infrared diffuse reflectance spectroscopy. *Transaction of the ASAE*, 44(5), 1265-1271.

Lu, R. (2004). Multispectral imaging for predicting firmness and soluble solids content of apple fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 31, 147-157.

Lu, R., Peng, Y. (2006). Hyperspectral scattering for assessing peach fruit firmness. *Biosystems Engineering*, 93(2), 161-171.

Lu, R., Peng, Y. (2008). Analysis of spatially resolved hyperspectral scattering images for assessing apple fruit firmness and soluble solids content. *Postharvest Biology and Technology*, 48, 52-62.

Manrique, K. K. (2000). Nociones del manejo de post-cosecha. *Agro Enfoque*, 15 (112), 7-11.

Maundy, B., Elwakil, A., S. (2012). Extracting single dispersion Cole – Cole impedance model parameters using an integrator setup. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. 71, 107-110.

McGlone, V. A., Jordan, B. R., Martinsen, J. P. (2002). Vis/NIR estimation at harvest of pre- and post-storage quality indices for 'Royal Gala' apple. *Postharvest Biology and Technology*, 25, 135-144.

Mehinagic, E., Royer, G., Symonneaux, R., Bertrand, D., Jourjon, F. (2004). Prediction of the sensory quality of apples by physical measurement. *Postharvest Biology and Technology*, 34(3), 257-269.

Miklavčič, D., Pavselj, N., Hart, X. F. (2006). Electric properties of tissues. *Wiley Encyclopedia of Biomedical Engineering*. New York, USA. John Wiley & Sons.

Mitcham, B. (1996). Quality assurance for strawberries: a case study. *Perishables Handling Newsletter Issue*, 85.

Mitcham, B., Cantwell M., Kader, A. (1996). Methods for determining quality of fresh commodities. *Perishables Handling Newsletter Issue*, 85.

Mohsenin, N. N. (1986). *Physical properties of plant and animal materials*. New York, USA Gordon and Breach Science Publishers.

Montoya, M. M., López-Rodríguez, V., De La Plaza, J. L. (1994). An improved technique for measuring the electrical conductivity of intact fruits. *LWT – Food Science and Technology*, 27 (1), 29-33

Moore, J. N., Sistrunk, W., A. 1980. Breeding strawberries for superior fruit quality. In *The Strawberry* ed N.F. Childers, 149-155. Florida: Horticultural Publications.

Morales, P. U., López, V. E., Otálora, O. C. (2010). Aspectos básicos en la interpretación de diagramas de impedancia electroquímica. *Dyna*, 162, 13-19. Recuperado de: www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/viewFile/.../16687

Muñoz, A. E., Llamosa, P. D., Segura, G. B., Rosales, R. A. Cárdenas, M. P., (2006). Caracterización de sistemas biológicos a través de la técnica de espectroscopía de impedancia bioeléctrica (EIB). *Revista de la Sociedad Colombiana de Física*, 38 (1), 321-324.

Nelson, S. O., Forbus, W. R., Lawrence, K. C. (1995). Assessment of microwave permittivity for sensing peach maturity. *Transactions of the ASAE*, 38(2), 579-585.

Nicolai, B.M., Bobelyn, E., Peirs, A., Saeys, W., Theron, K.I., Lammertyn, J. 2007. Nondestructive measurement of fruit and vegetable quality by means of NIR spectroscopy: A review. *Postharvest Biology and Technology*, 46(2), 99-118

Nourain, J., Ying, Y., Wang, J., Rao, X., Yu, C. (2005). Firmness evaluation of melon using its vibration characteristics and finite element analysis. *Journal of Zhejiang University*, 6(6), 483-490.

NMX-FF-9-1982. Productos alimenticios no industrializados, para uso humano – fruta fresca – determinación del tamaño en base al diámetro ecuatorial.

NMX-FF-014-1982. Productos alimenticios no industrializados, para uso humano – fruta fresca – determinación de la resistencia a la penetración.

NMX-FF-062-SCFI-2002. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano – fruta fresca - fresa (*Fragaria x ananassa*, Duch) – Especificaciones y método de prueba.

Nunes, M. C. C., Brecht, J. K., Morais, A. M., Sargent, S. A. (2006). Physicochemical changes during strawberry development in the field compared with those that occur in harvested fruit during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86, 180-190.

Ochmian, I., Grajkowski, J. (2008). Influence of storage on mass loss and firmness changes of two strawberry cultivars. *Acta Agrophysica*, 11(1), 141-145.

Ortiz, C. (1999). Sistemas instrumentales de detección y cuantificación de la lanosidad en melocotón. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. España.

Ortiz, C., Barreiro, P., Correa, E., Riquelme, F., Ruiz-Altisent, M. (2001) Non-destructive identification of woolly peaches using impact response and near-infrared spectroscopy. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78(3), 281-289.

Pelayo-Zaldivar, C., Ebeler, E. S., Kader, A. A. (2005). Cultivar and harvest date effects on flavor and other quality attributes of California strawberries. *Journal of Food Quality*, 28, 78-97.

Pitts, M., Drake, S., Cavalieri, R. (1997). Apple size and length of storage affects firmness. 13th Annual Postharvest Conference. Recuperado de: postharvest.tfrec.wsu.edu/pages/PC97D

Prussia, S. E., Tetteh, M. K., Verma, B. P., NeSmith, D. S. (2006). Apparent modulus of elasticity from Firmtech₂ firmness measurement of blueberries. Transactions of the ASAE, 49(1), 113-121.

Rehman, M., Abu Izneid, B. A. J. A., Abdullah, M. Z., Arshad, M. R. (2011). Assessment of quality of fruits using impedance spectroscopy. International Journal of Food Science and Technology. 46, 1303 – 1309.

Restrepo, F. J., Aristizábal, T. I. (2010). Conservación de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch cv. *Camarosa*) mediante la aplicación de recubrimientos comestibles de gel mucilaginoso de penca de sábila (*Aloe barbadensis* Miller) y cera de carnauba. VITAE, 17(3), 252-263.

Rigaud, B., Morucci, J. P., Chauveau, N. (1996). Bioelectrical impedance techniques in medicine. Part I: Bioimpedance measurement. Crit. Rev. Biomed. Eng, 24(4-6), 257-351.

Rosenthal, A. J. (1999). Food texture: measurement and perception. U.S.A. An Aspen Publication.

Ruiz- Altisent, M., Ruiz-García, L., Moreda, G. P., Lu, R., Hernández-Sánchez, N., Correa, E. C., Diezma, B., Nicolai, B., García-Ramos, J. (2010). Sensors for product characterization and quality of specialty crops – A review. Computers and Electronics in Agriculture, 74, 176-194.

SAGARPA. (2012). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. <http://www.sagarpa.gob.mx>

Salazar, M. Y. (2004). Caracterización de tejidos cardiacos mediante métodos mínimamente invasivos y no invasivos basados en espectroscopía de impedancia eléctrica. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Sarang, S., Sastry, S. K., Knipe, L. (2008). Electrical conductivity of fruits and meats during ohmic heating. *Journal of Food Engineering*, 87(3), 351-356.

Shmulevich, I. Galili, N. Howarth, S. M. (2003). Nondestructive dynamic testing of apples for firmness evaluation. *Postharvest Biology and Technology*, 29(3), 287-299.

Sistema Producto Fresa. (2009) Plan Rector Nacional Convergente. CONAFRE A.C. Consejo Nacional de la Fresa. Plan Rector revisado, actualizado y validado por el Comité Nacional del Sistema Producto Fresa el 05 de Diciembre de 2008 en Zamora, Mich. y Priorización de proyectos durante la Quinta Reunión Ordinaria, celebrada el 20 de Febrero del 2009 en la misma ciudad.

Studman, C. J. (1995). Alternative firmness testing methods for fruit and vegetables. *Acta Horticulturae, Quality of fruit and vegetables*, 379, 545-552.

Szczesniak, A. S., Smith, B. J. (1969). Observations on strawberry texture, a three-pronged approach. *J. Textural Studies*, 1, 65-89.

Tetteh, M. K., Prussia, S. E., NeSmith, D. S., Verma, B. P., Aggarwal, D. (2004). Modeling blueberry firmness and mass loss during cooling delays and storage. *Transactions of the ASAE*, 47(4), 1121-1127.

Timm, E. J., Brown, G. K., Armstrong, P. R., Beaudry, R. M., Shirazi, A. (1996). Portable instrument for measuring firmness of cherries and berries. *Applied Engineering in Agriculture*, 12(1), 71-77.

Tippens, P. E. (1991). *Física básica*. México. McGRAW – HILL

Torregrosa, A., Martín, B., Bernard, J. J., Aragón, R., Chaparro, O. (2003). Recolección mecánica de albaricoque Búlida para la industria. IMIDA. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente de la Región de Murcia, España.

Ubierna, V. C., Ruiz-Altisent, M. (2000). Conjunto de técnicas de medida de la calidad y atributos de frutas. *Vida Rural*, 116, 60-64.

Valente, M., Ferrandis, J. Y. (2003). Evaluation of textural properties of mango tissue by a near-field acoustic method

Valero, U. C. (2001). Aplicación de la Espectroscopía láser de reflectancia difusa (ERDT) a la medida de calidad interna de frutas y hortalizas. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid.

Valero, C., Bowerman, E., Crisosto C. H., Garner, D., Slaughter, D. (2003). Introducing nondestructive flesh color and firmness sensors to the tree fruit industry. *Int. Conference on Quality in Chains. Acta Horticulturae*, 604, 597-600.

Vozáry, E., Benko, P. (2010). Non – destructive determination of impedance spectrum of fruit flesh under the skin. *International Conference on Electrical Bioimpedance. Journal of Physics: Conference series* (2010) 012142

Watada, A. E., Herner, R. C., Kader, A. A., Romani, R. J., Staby, G. L. (1984). Terminology for the description of developmental stages of horticultural crops. *HortScience*, 19(1), 20-21.

Watkins, C. B., Nock, F. J., Whitaker, D. B. (1999). Responses of early, mid and late season apple cultivars to postharvest application of 1-methylcyclopropene (1-MCP) under air and controlled atmosphere storage conditions. *Postharvest Biology and Technology*, (19), 17-32.

Watkins, C. B., Leake, A., Hoggett, S., M., Bowen, J. H. (1995). Maturation and storage quality of six 'Golden Delicious' x 'Red Dougherty' apple selections. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 23, 49-54.

Wrolstad, E. R. (1993) Color and pigment analyses in fruit products. Agricultural Experiment Station. Oregon State University. Station Bulletin 624

Wu, T., Abbott, A. J. (2001). Firmness and force relaxation characteristics of tomatoes stored intact or as slices. *Postharvest Biology and Technology*, 24(1), 59-68.

Yommi, A., Fernandez, V., Guerra, N., Cendoya, G., Quillehauquy, V. (2012). Skin color changes in fruits of two Sweet cherry cultivars, its heterogeneity and relationship with quality indices. *Acta Hort. (ISHS)* 934, 1055-1059

Anexos

Anexo 1. Diagrama cromático CIE para $L^* = 50$

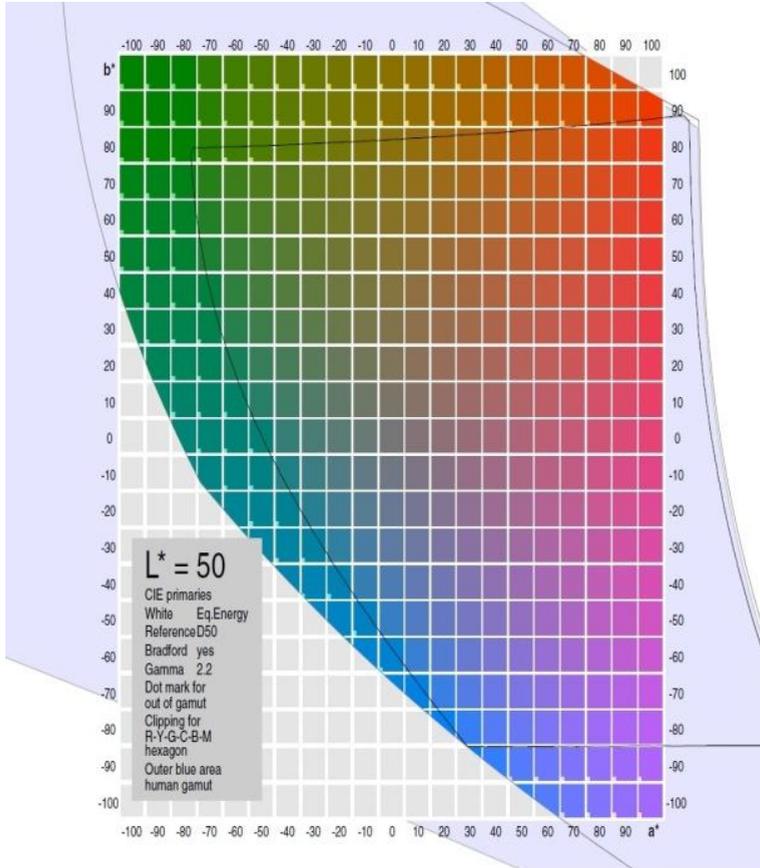


Figura A-1. Espacio de color para la coordenada de cromaticidad a un valor de $L^* = 50$

Anexo 2. Norma Mexicana NMX-FF-9-1982 Productos alimenticios no industrializados, para uso humano – fruta fresca – determinación del tamaño en base al diámetro ecuatorial.

SECRETARÍA DE COMERCIO Y FOMENTO INDUSTRIAL
NORMA MEXICANA
NMX-FF-9-1982
PRODUCTOS ALIMENTICIOS NO INDUSTRIALIZADOS, PARA
USO HUMANO-FRUTA FRESCA-DETERMINACIÓN DEL
TAMAÑO EN BASE AL DIÁMETRO ECUATORIAL

NON INDUSTRIALIZED FOOD PRODUCTS FOR HUMAN USE-FRESH
FRUIT-DETERMINATION OF SIZE BASED ON ECUATORIAL
DIAMETER

DIRECCIÓN GENERAL DE NORMAS
PREFACIO

En la elaboración de esta norma, participaron los siguientes Organismos:

SUBSECRETARÍA DE SALUBRIDAD. DIRECCIÓN GENERAL DE LABORATORIOS DE SALUD PÚBLICA.
SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRÁULICOS
COMISIÓN NACIONAL DE FRUTICULTURA LABORATORIOS DE INVESTIGACIÓN.

1 OBJETIVO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Esta Norma Oficial Mexicana establece el método para determinar el tamaño de la Fruta Fresca en base al diámetro ecuatorial.

2 REFERENCIAS

Esta Norma se complementa con las vigentes de las siguientes Normas Oficiales Mexicanas:

- NOM-FF-6 Productos alimenticios no industrializados para uso humano.
Fruta fresca - Terminología.
- NOM-Z-12 Muestreo para la inspección por atributos.

3 FUNDAMENTO

Este método se basa en determinar el crecimiento de la fruta que es proporcional al aumento de su diámetro ecuatorial, y midiendo éste, se tiene un índice del tamaño.

4 APARATOS Y EQUIPO

4.1 Calibradores de tamaños especiales para cada especie frutícola

4.2 Calibrador con vernier (Pie de Rey)

5 MUESTREO

Para llevar a cabo un muestreo durante alguna inspección, éste puede ser establecido de común acuerdo entre vendedor y comprador. De no haber ningún acuerdo, se recomienda seguir el procedimiento indicado en la Norma NOM-Z-12 (véase sección 2).

6 PROCEDIMIENTO

6.1 Cuando se utiliza un calibrador especial para la especie frutícola el tamaño se determina de la siguiente manera: se introduce la fruta en el orificio del calibrador (véase fig. 1) con la medida que se considera que tiene la fruta; si dicho orificio es más pequeño que la fruta, se prueba en el tamaño inmediato superior y así sucesivamente, hasta que la fruta atraviese alguno de los orificios, pero si ésta atraviesa holgadamente dicho orificio, se toma la medida de inmediato inferior como tamaño de la fruta.

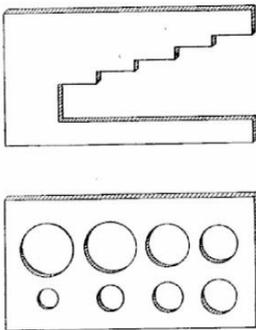


FIGURA. 1 DIFERENTES TIPOS DE CALIBRADORES

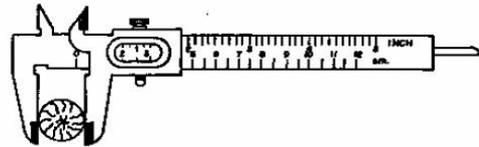


FIGURA. 2 MEDICION CON UN "PIE DE REY" DEL DIAMETRO ECUATORIAL DE UNA NUEZ.

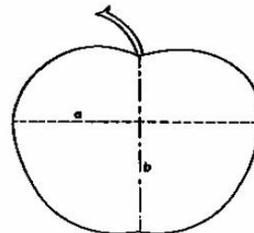
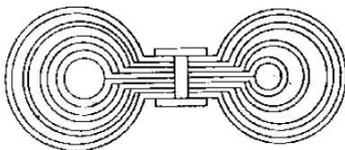


FIGURA.3 A) DIÁMETRO ECUATORIAL Y B) DIÁMETRO POLAR

6.2 Cuando se determina el tamaño con un calibrador vernier o Pie de Rey (véase figura 2) se medirá la fruta por su diámetro ecuatorial (véase figura 3) tomándose la lectura directamente en la escala del "vernier".

7 EXPRESION DE RESULTADOS

Los resultados deben expresarse en centímetros en ambos casos.

8 INFORME DE LA PRUEBA

El resultado final será la media aritmética de las determinaciones realizadas.

9 BIBLIOGRAFIA

NOM-Z-13-1977 Guía para la redacción, estructuración y presentación de las Normas Oficiales Mexicanas.

EL DIRECTOR GENERAL DE LA COMISIÓN NACIONAL
DE FRUTICULTURA.

ING. PEDRO TELMO DE LANDERO.

EL DIRECTOR GENERAL DE NORMAS COMERCIALES DE LA SECRETARÍA
DE COMERCIO.

LIC. HÉCTOR VICENTE BAYARDO MORENO.

EL DIRECTOR GENERAL DE NORMAS.

DR. ROMÁN SERRA CASTAÑOS.

Fecha de aprobación y publicación: Junio 10, 1982.

Anexo 3. Equipos para medir la calidad de frutos.

En la Figura A-3 se muestra el principio de operación del *"Massey Twist Tester"*. La muestra es empujada hacia una hoja montada sobre una base hasta que penetra la fruta a una determinada profundidad. El fruto comienza a girar para que la hoja gire. Un sistema simple colocado al final del brazo en sentido opuesto a la hoja es usado para aplicar un incremento en el momento (torque) a la hoja, para dar resistencia a la rotación. Cuando ocurre el daño al tejido, el máximo momento puede ser calculado desde el ángulo del brazo. Como se mencionó la ventaja de este sistema es que la medición es rápida, simple, no requiere de remover parte de la cáscara del fruto y daña solo una pequeña porción de la muestra.

Este equipo es una alternativa de bajo costo, el cual ofrece tanto a investigadores como productores una útil herramienta para medir el estado de madurez de productos hortofrutícolas.

El equipo **DUROFEL** (Figura A-2) es utilizado para medir de manera no destructiva la firmeza y monitorear la calidad de frutas y vegetales. Permite obtener rápidamente mediciones confiables y exactas. Es portátil, autónomo y a través de una pantalla digital se pueden observar los valores de la firmeza de cada lote de muestras los cuales son procesados para obtener la media aritmética y la desviación estándar. Su sistema electrónico permite almacenar los datos para después imprimirlos o transferirlos a una computadora personal. El equipo **DUROFEL** es utilizado para medir la calidad de frutos como los arándanos

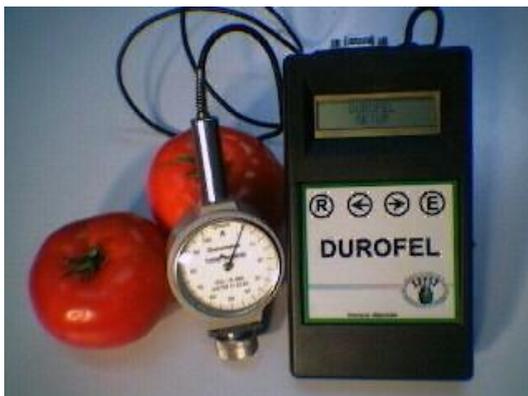


Figura A-2. Equipo DUROFEL no destructivo para medir la firmeza.
www.durofel.com

La empresa “BioWorks, Inc.”⁴, está dedicada a la investigación y control de la calidad poscosecha tanto de frutos pequeños (uvas, fresas y arándanos) como grandes (manzanas, peras y duraznos). Para los primeros, ha desarrollado “*the BioWorks FirmTech II*”, instrumento diseñado para medir de manera rápida la firmeza. Los frutos son colocados sobre 25 recipientes ordenados alrededor de un disco de aluminio (Figura A-3) que rota automáticamente alineando a cada fruto por debajo de una celda de carga que con un movimiento vertical descendente y ascendente comprime de manera suave la muestra. Un programa de cómputo controla los componentes del hardware registrando las fuerzas máximas y mínimas, así como la velocidad del movimiento vertical de la celda de carga.



Figura A-3. Detalle del equipo “*FirmTech II*” para medir la firmeza de frutos pequeños. www.bio-works.us

El equipo “*Portable Instrument for Measuring Firmness*” consiste de una computadora IBM compatible, una unidad central de procesamiento que incluye un microprocesador, memoria de almacenamiento, convertidor A/D y una batería, incluyendo el dispositivo para medir la firmeza (Figura A-4). Este dispositivo, en forma de Y, está construido de aluminio en el cual está montado un motor paso a paso, un émbolo y dos platos: uno movable y otro conectado a la celda de carga y a un puerto serial de comunicación.

⁴ <http://www.bio-works.us/>

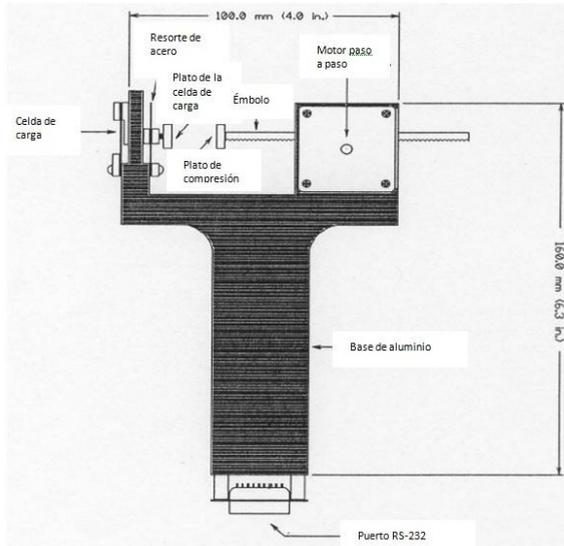
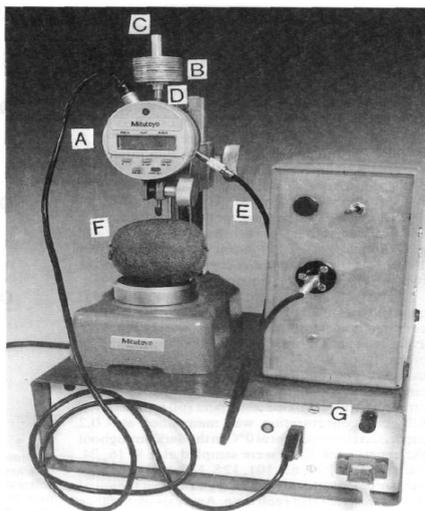


Figura A-4. Diagrama del dispositivo portátil para medir la firmeza. Timm *et al*, 1996.

En la Figura A-5 se muestra el equipo “*Softness Meter*” el cual fue desarrollado por la Universidad de Massey, Palmerston North y que ha sido utilizado para medir la firmeza de frutos como el kiwi. En este caso la medición de la firmeza se basa en la resistencia del fruto cuando éste es deformado por una carga de fuerza conocida. Este prototipo consta de un micrómetro el cual mide la deformación de la superficie del fruto cuando éste es sometido a una carga de 0,100 kg utilizando una probeta de 40 mm de longitud y un diámetro de 15 mm.



Una unidad motorizada es utilizada para levantar y bajar el tubo de aluminio por medio de un cable disparador con un tiempo cíclico de 15 s. El micrómetro colocado por encima del fruto es ajustado para colocar la probeta justo por encima de la muestra.

Figura A-5. “*Softness meter*”. A. micrómetro digital; B. pesa de 0,100 kg; C. tubo con anillo en la base conectado a D; D. huso del micrómetro; E. cable de arranque; F. fruto y G, sistema de adquisición de datos. Davie *et al*, 1996.

En la Figura A-6 se muestra el **impactador de caída libre** el utilizado por Diezma *et al.* (2001). El cuerpo impactante está formado por un vástago cilíndrico al cual se le pueden adaptar diferentes elementos semiesféricos (cabezas), lo que permite modificar la masa y el diámetro del cuerpo impactante. Generalmente, se utiliza una cabeza metálica semiesférica con un diámetro de 19 mm cuyo peso total es de 50,4 g incluyendo la masa de la probeta. Un acelerómetro está unido a la varilla. El cuerpo impactante está sujeto a un electroimán que permite la caída en el momento preciso. El fruto es colocado en un soporte cóncavo que impide el movimiento casi en su totalidad. Cuando la masa impactante entra en contacto con la muestra, la señal del acelerómetro es enviada a una tarjeta digitalizadora. Los datos son almacenados y procesados.

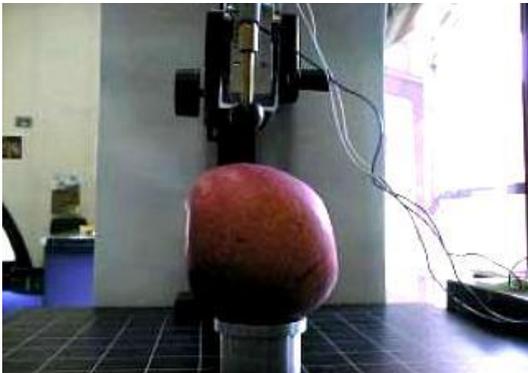


Figura A-6. Detalle del impactador de caída libre. Diezma *et al.*, 2001.

El tiempo de ensayo es de 15 a 20 segundos, incluida la colocación de la fruta y la realización del impacto. Algunos factores que deben considerarse en este tipo de pruebas son: la masa del acelerómetro y del cuerpo impactante así como la velocidad del impacto. Se empleó un vástago con un extremo esférico de 50 g y 0,94 cm de radio de curvatura, lanzado desde una altura de 4 cm.

Basado en el análisis teórico del impacto de dos esferas elásticas, la magnitud de la fuerza de impacto, F , en cada uno de los cuerpos puede ser expresada como:

$$F = \left(\frac{5}{4} \frac{V^2}{n_1} \right)^{3/5} n^{2/5} \quad (42)$$

Donde:

V, velocidad relativa de acercamiento entre ambas esferas

$$n_1 = \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \quad (43)$$

$$n = \frac{4}{3} \frac{E}{(1 - \mu^2)} \left[\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right]^{1/2} \quad (44)$$

m_1 = masa del impactador

m_2 = masa del fruto

R_1 = radio del impactador

R_2 = radio de curvatura de la superficie del fruto

μ = coeficiente de Poisson del fruto

E = módulo de elasticidad del fruto

La máxima deformación, D, del fruto puede ser descrita como:

$$D = \left(\frac{5}{4} \frac{V^2}{n n_1} \right)^{2/5}, \quad (45)$$

Y el tiempo requerido para alcanzar la fuerza máxima puede ser expresado como:

$$t = 1,47 \frac{D}{V}, \quad (46)$$

Asumiendo un efecto gravitacional despreciable durante el impacto se puede expresar la aceleración máxima A, del impactador como:

$$A = F/m_1, \quad (47)$$

La proporción A/t frecuentemente es usado como un índice de la firmeza y puede ser expresado como se muestra a continuación:

$$A/t = 0,68 \text{ } FV/Dm_1, \quad (48)$$

El prototipo “**SoftSense**” fue diseñado y desarrollado por la empresa “**HortResearch**”, ubicada en Nueva Zelanda. Este sistema se basa en la medición del tiempo en que tarda un fruto en hacer un segundo contacto una vez que se dejó caer sobre un sensor. Esta característica es usada para estimar la firmeza de los frutos de forma no destructiva. El fruto es lanzado suavemente desde una altura de 10 mm sobre un sensor, estimando el tiempo de demora (“*dwell time*”) para hacer el segundo contacto con el sensor. El tiempo de demora está en función del tiempo en que la fruta está en contacto con el sensor.

El “**Sinclair Internal Quality Firmness tester**” (SIQ-FT, por sus siglas en inglés)⁵. Este instrumento realiza la medición montado sobre una banda transportadora que a su vez transporta rodillos acanalados en constante movimiento rotatorio con el fin de individualizar cada fruto logrando una distancia estándar entre ellos.

El sistema (Figura A-7) tiene un sensor neumático el cual tiene un cabezal, equipado con un generador piezo-cerámico, el cual es empujado al final del muelle cada vez que el equipo golpea el fruto. El sensor electrónico es capaz de convertir la fuerza en voltaje. La señal de voltaje pasa a través de un convertidor análogo/digital (A/D). La señal de voltaje resultante depende de la firmeza del fruto.

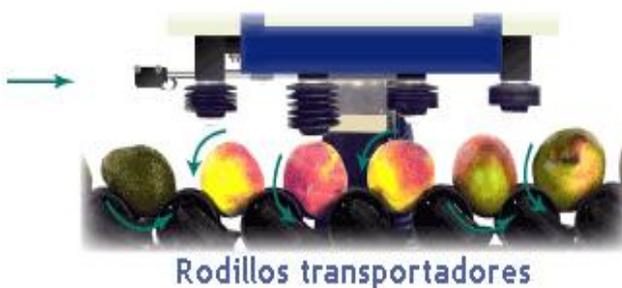


Figura A-7. Medidor de firmeza Sinclair iQ™.

⁵ http://www.sinclair-intl.com/pages/iQ_pages/iq_online.html

Durante esta prueba se obtiene un índice de calidad interno (IQ) y dos parámetros convencionales de impacto C1 y C2 (ecuaciones 14 y 15). Este equipo tiene un dispositivo que golpea el fruto por medios neumáticos y registra la señal de impacto. Un programa de adquisición de datos y análisis de la señal son empleados para determinar el índice interno de calidad de la muestra en estudio. El valor IQ es calculado de acuerdo a la señal de impacto como una medida dinámica de la constante de elasticidad del tejido del fruto y puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$IQ = C \left(\frac{P_{m\acute{a}x}}{\int p(t)dt} \right)^2, \quad (49)$$

Donde C es una constante del sistema, $P_{m\acute{a}x}$ es la amplitud del pico de la respuesta al impacto y $p(t)$ la respuesta al impacto en función del tiempo.

Para llevar a cabo las pruebas acústicas utilizando el equipo **AWETA** el fruto es colocado en un recipiente de forma hemisférica hecho de material blando, un micrófono colocado en la parte inferior de la muestra capta la señal acústica producida por el impacto suave de una esfera de plástico unida a una pequeña probeta del mismo material. El micrófono se encuentra conectado a una tarjeta de sonido de una computadora la cual a través del programa Matlab® graba y procesa la señal acústica. Obteniendo la frecuencia de resonancia del primer modo elíptico y calculando la masa de la muestra se puede obtener el factor S (Figura A-8)

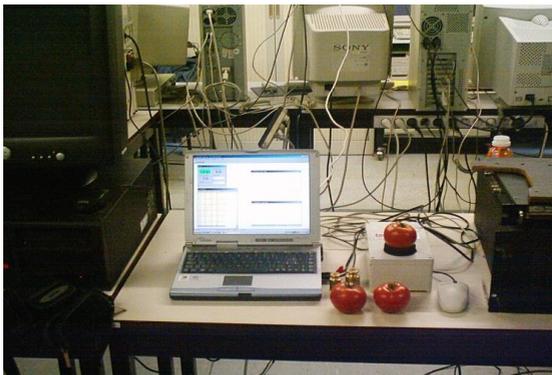


Figura A-8. Equipo AWETA para medir el factor S . Departamento de Maquinaria Agrícola y Procesos de la Universidad Católica de Leuven, Bélgica.

Las mediciones realizadas en el trabajo de Lu (2001) se llevaron a cabo utilizando un sistema espectrofotométrico marca Oriel Instruments. El sistema consiste de una fuente de luz DC con una unidad de control, un monocromador, un detector termoelectrónico (InGaAs) conectado a la unidad Oriel y un equipo de cómputo. La fuente de iluminación fue utilizando una lámpara de halógeno-tungsteno de 250 W. El fruto es iluminado y la luz reflejada fue capturada utilizando un detector de fibra óptica y enviada al monocromador, donde la luz es dispersada según la longitud de onda. La luz dispersada a diferentes longitudes de onda es detectada por el InGaAs y convertida en señales electrónicas. Los resultados mostraron una alta correlación con los valores obtenidos de la técnica de Magness- Taylor obteniendo un valor de $r=0,8$ (para 800 nm).

El sistema consiste de una cámara CCD de alto rendimiento con un zoom de F2.5-16C y longitud focal de 18-108 mm, un filtro de densidad neutral (NDF), un disco giratorio que contiene 5 filtros y una fuente de luz de banda ancha. La fuente de luz es generada por una lámpara de tungsteno- halógeno de 250 W con una unidad de control de corriente directa la cual, para lograr un rayo agudo e intenso, pasa a través de una fibra óptica (con un diámetro de 600 μm), que ilumina una porción del fruto. Una vez que la luz interactúa con el tejido del fruto, una porción de luz dispersada regresa y sale del fruto en un área (*scattering area*) contigua y adyacente con el área de incidencia, Figura A-9.

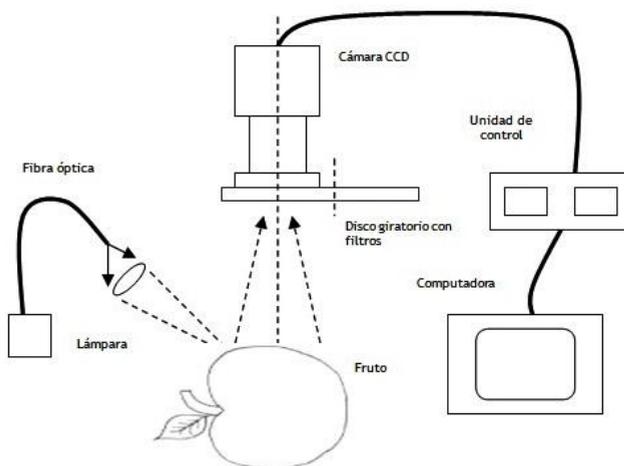


Figura A-9. Sistema de imagen multispectral. Lu, 2004.

Un aspecto importante a considerar es el tamaño del haz. Un haz grande ofrece un gran rendimiento de luz pero puede complicar la cuantificación de la luz dispersada en el fruto ya que los fotones que salen de la misma ubicación del fruto no necesariamente tienen el mismo comportamiento. Un haz pequeño es conveniente para cuantificar la luz esparcida pero también significa una baja eficiencia para el sistema de iluminación, ya que hay un menor número de fotones recibidos por el dispositivo de detección y una pequeña área de dispersión (Figura A-10). El filtro de densidad neutral es usado para reducir la intensidad de la luz reflejada desde el área de incidencia que puede fácilmente saturar un gran número de píxeles de la cámara.

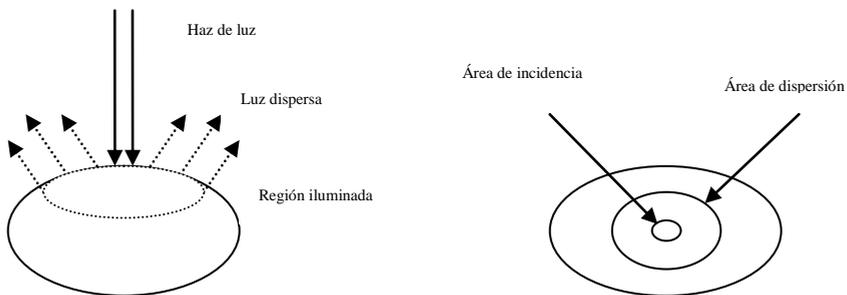


Figura A-10. Esquema de un sistema de imagen multispectral para medir la dispersión de la luz en manzana. Lu, 2004.

La ERDT con resolución temporal es una técnica óptica, desarrollada en principio para diagnóstico médico, que permite diferenciar los fenómenos de absorción y dispersión de la luz proporcionando una caracterización óptica completa de los tejidos. Esta técnica se basa en la medida del retardo y el ensanchamiento temporal experimentado por un corto pulso de luz que viaja a través de un medio turbio (fruta). La fuente de luz empleada es un láser, monocromática por tanto, pero sintonizable a diferentes longitudes de onda. Dicha luz láser (Figura A-11) es inyectada y recogida en el medio respectivamente con un par de fibras localizadas directamente sobre su superficie a una distancia fija. Con esta técnica es posible medir a la vez el coeficiente de absorción (μ_a) y el coeficiente de dispersión de transporte (μ_s) en el medio por el cual ha viajado la luz.

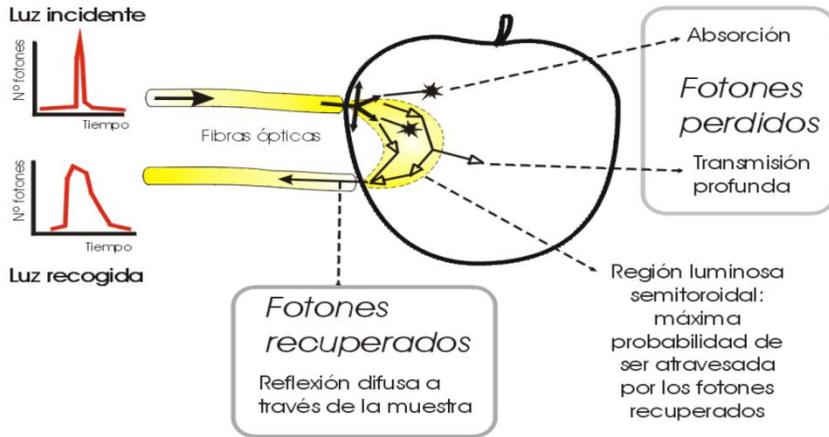


Figura A-11. Principio de funcionamiento de la técnica ERDT. Valero, 2001.

El equipo utilizado (Figura A-12) tiene como fuente de iluminación un láser modulado de pulsos sincronizados. El láser principal de argón es excitado por otro láser de tipo líquido colorante. El láser es sintonizable en el rango entre 610 y 700 nm. La luz es inyectada y recogida de la muestra mediante una fibra óptica de plástico-vidrio de un milímetro de grosor y uno de longitud, a una distancia relativa de 1,5 cm. Un dispositivo de sujeción de las fibras las mantiene en contacto con la muestra con sus terminaciones en paralelo lo que evita la captura de la reflexión especular directa.

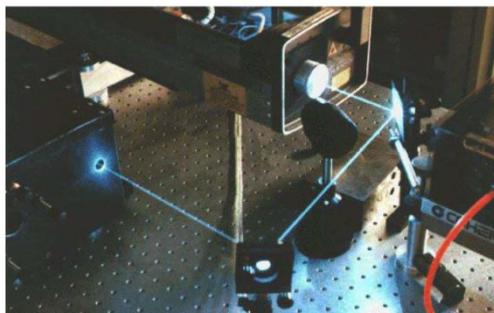


Figura A-12. Equipo ERDT de laboratorio. Valero, 2001.

El otro extremo de la fibra colectora se sitúa a la entrada de un monocromador de barrido, acoplado a un fotomultiplicador de doble capa micro–canal. La señal es procesada por un contador de fotones individuales en el tiempo. El control automatizado permite adquirir en un minuto cada conjunto de curvas de reflectancia en el dominio del tiempo, entre 610 y 700 nm cada 5 nm, registrando 100.000 puntos por curva. Para el rango infrarrojo se sustituye el láser principal por uno que genera longitudes de onda en el infrarrojo cercano (Valero, 2001).

El sistema de **imagen hiperespectral** fue desarrollado por el departamento de agricultura de los Estados Unidos de América y consiste principalmente de una cámara CCD de alto rendimiento con iluminación posterior, un espectrógrafo de imágenes y como fuente de luz una lámpara de tungsteno – halógeno con un compuesto de cuarzo. (Figura A-13).

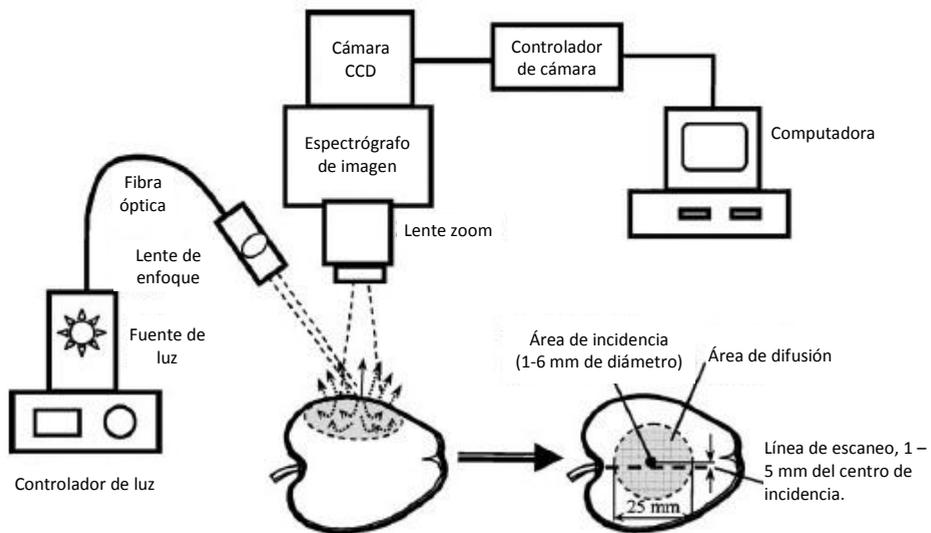


Figura A-13. Esquema del sistema de imagen hiperespectral. Lu y Peng, 2006.

El espectrógrafo de imágenes adquiere información espectral a través de un escaneo lineal del fruto dispersando la luz desde esta línea en diferentes longitudes de onda, usando una

configuración prisma – rendija – prisma, preservando al mismo tiempo su información espacial original. Las señales de la luz dispersa son proyectadas sobre el detector de la cámara CCD creando una imagen bidimensional, una representa la espacial y la otra la espectral. La fuente de luz es un haz de 1-6 mm de diámetro con un ángulo de divergencia menor a 17°. Como el haz de luz golpea el fruto, ilumina una porción rodeando el punto de incidencia como resultado de la dispersión de la luz y propagación en el tejido. Esto genera una imagen de retro dispersión en la superficie del fruto. Los datos obtenidos son enviados a una computadora a través de la cual se obtienen los perfiles espectrales y los perfiles de dispersión. Para más detalles ver Lu y Peng (2006 y 2008).

La **Resonancia Magnética Nuclear** induce la transición de protones entre los niveles de energía para establecer un estado de desequilibrio y entonces observar el retorno al equilibrio. La frecuencia de la energía necesaria para excitar el sistema está dada por la ecuación de Larmor:

$$\nu = \gamma B / 2\pi, \quad (50)$$

Donde ν es la frecuencia de precesión, γ es la proporción magnética y B la fuerza magnética externa.

Un pulso de radio frecuencia (RF) en la frecuencia de Larmor excita el sistema nuclear espín (núcleos magnéticamente activos), y una señal de radio es emitida por la muestra cuando retorna al equilibrio. La intensidad de la señal es detectada en el tiempo y a través de la transformada de Fourier es convertida a un campo de frecuencia vs intensidad llamado espectro de RMN. La señal proporciona información acerca del ambiente del núcleo. Normalmente, el núcleo excitado es el H^+ y, por lo tanto, la información relacionada con la firmeza obtenida de la señal NMR es vinculada al contenido de agua de la muestra, al agua libre y a los enlaces de hidrogeno presentes en los constituyentes estructurales de los tejidos. La estimación de la firmeza con esta técnica es usualmente lograda por

la cuantificación del estado de madurez o del agua libre (García-Ramos *et al.* 2005). El equipo para medidas de resonancia magnética nuclear está integrado por cuatro principales componentes: 1) Un imán estable, con un controlador que produce un campo magnético preciso, 2) Un transmisor de radio frecuencias, capaz de emitir frecuencias precisas, 3) Un detector para medir la absorción de energía de radiofrecuencia de la muestra y 4) Un ordenador y registrador para realizar las gráficas que constituyen el espectro RMN.

Anexo 4. Gráficas de los valores de las características físicas (diámetro ecuatorial y polar y peso) de las fresas variedad ‘Sweet charlie’, tamaños B y C con “*grados de madurez*” 4, 5 y 6.

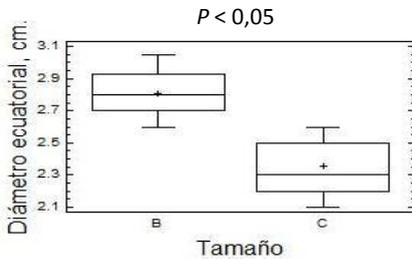


Figura A-14. Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad ‘Sweet charlie’ “*grado de madurez*” 4.

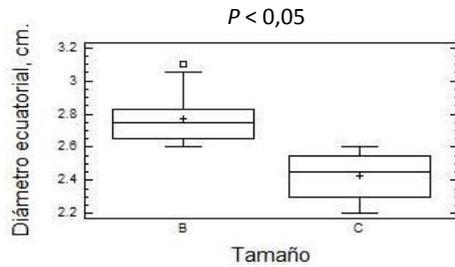


Figura A-15. Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad ‘Sweet charlie’ “*grado de madurez*” 5.

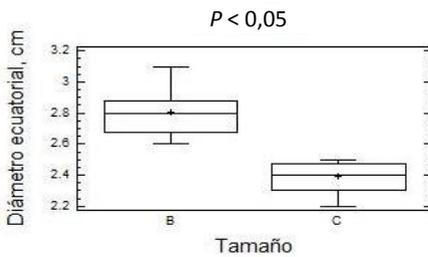


Figura A-16. Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad ‘Sweet charlie’ “*grado de madurez*” 6.

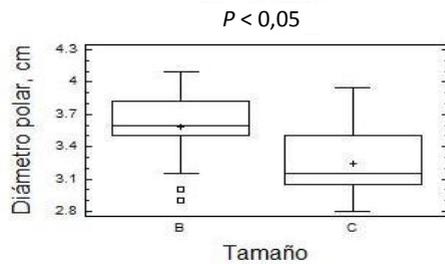


Figura A-17. Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad ‘Sweet charlie’ “*grado de madurez*” 4.

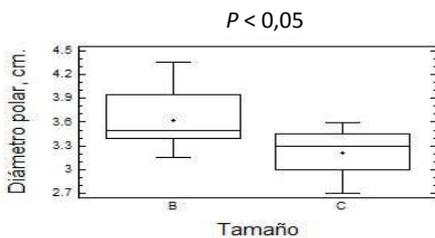


Figura A-18. Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad ‘Sweet charlie’ “*grado de madurez*” 5.

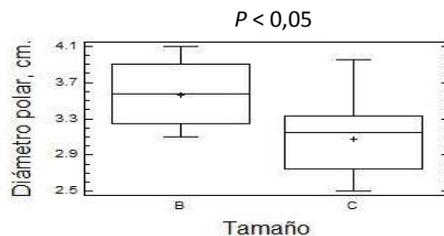


Figura A-19. Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad ‘Sweet charlie’ “*grado de madurez*” 6.

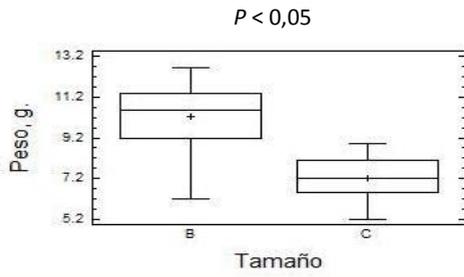


Figura A-20. Gráfica de los valores para el peso de fresas variedad 'Sweet charlie' "grado de madurez" 4.

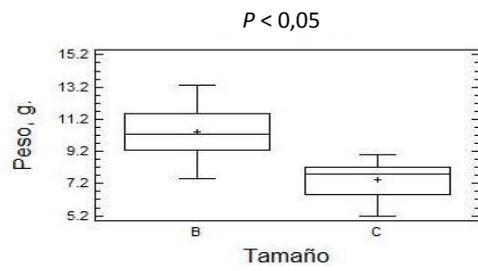


Figura A-21. Gráfica de los valores para el peso de fresas variedad 'Sweet charlie' "grado de madurez" 5.

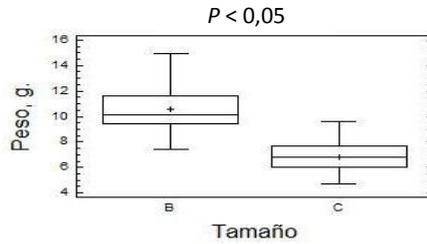


Figura A-22. Gráfica de los valores para el peso de fresas variedad 'Sweet charlie' "grado de madurez" 6.

Anexo 5. Gráficas de los valores de las características físicas (diámetro ecuatorial y polar y peso) de las fresas variedad ‘Festival’, tamaños B y C con “*grados de madurez*” 2, 4 y 6.

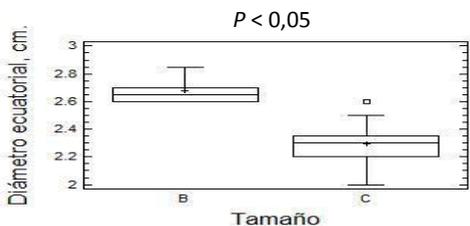


Figura A-23. Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad ‘Festival’ “grado de madurez” 2.

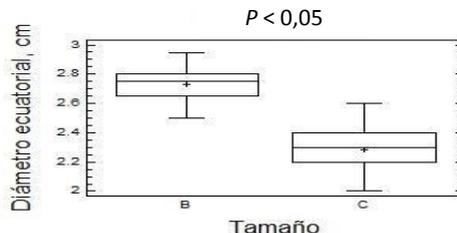


Figura A-24. Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad ‘Festival’ “grado de madurez” 4.

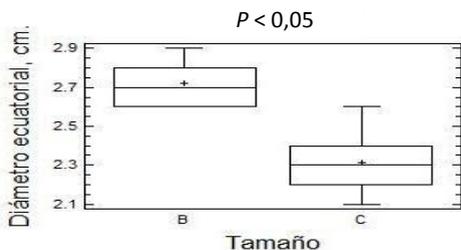


Figura A-25. Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad ‘Festival’ “grado de madurez” 6.

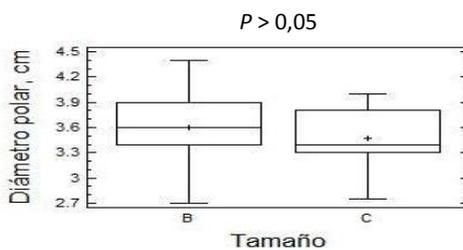


Figura A-26. Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad ‘Festival’ “grado de madurez” 2.

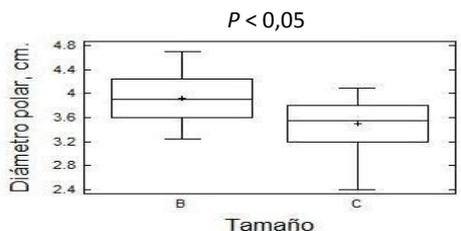


Figura A-27. Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad ‘Festival’ “grado de madurez” 4.

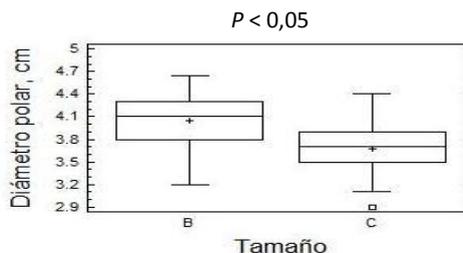


Figura A-28. Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad ‘Festival’ “grado de madurez” 6.

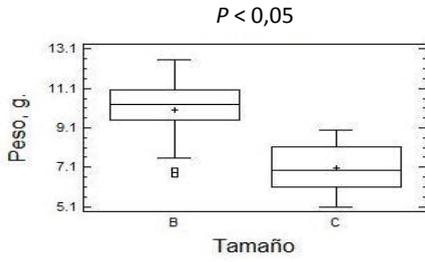


Figura A-29. Gráfica de los valores del peso de las fresas variedad 'Festival' "grado de madurez" 2.

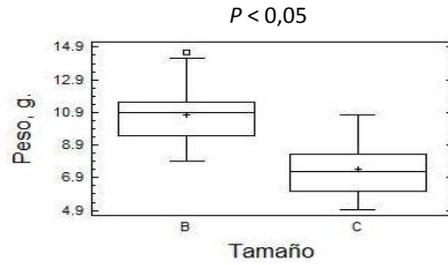


Figura A-30. Gráfica de los valores del peso de las fresas variedad 'Festival' "grado de madurez" 4.

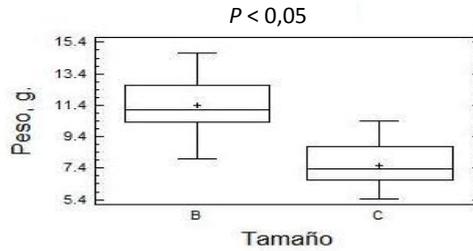


Figura A-31. Gráfica de los valores del peso de las fresas variedad 'Festival' "grado de madurez" 6.

Anexo 6. Gráficas de los valores de las características físicas (diámetro ecuatorial y polar y peso) de las fresas variedad ‘Camino real’, tamaños B y C con “*grados de madurez*” 2, 4 y 6.

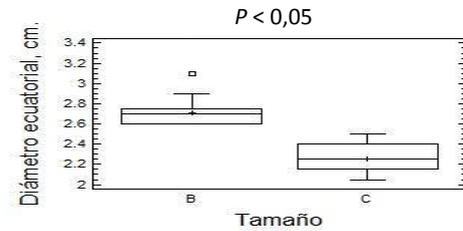


Figura A-32. Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad ‘Camino real’ “*grado de madurez*” 2.

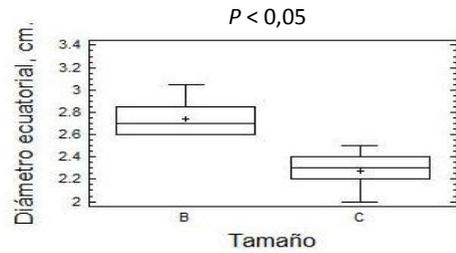


Figura A-33. Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad ‘Camino real’ “*grado de madurez*” 4.

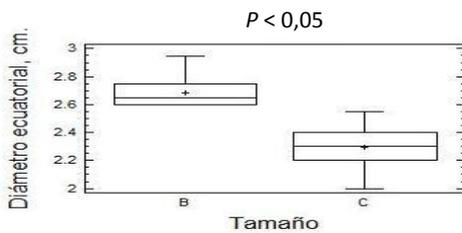


Figura A-34. Gráfica de los valores para el diámetro ecuatorial de fresas variedad ‘Camino real’ “*grado de madurez*” 6.

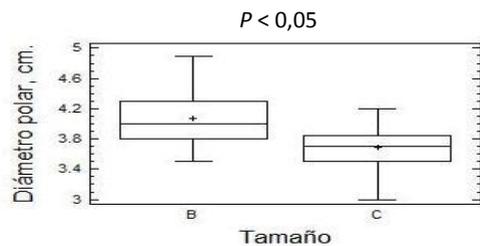


Figura A-35. Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad ‘Camino real’ “*grado de madurez*” 2.

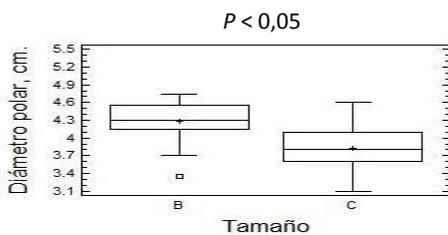


Figura A-36. Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad ‘Camino real’ “*grado de madurez*” 4.

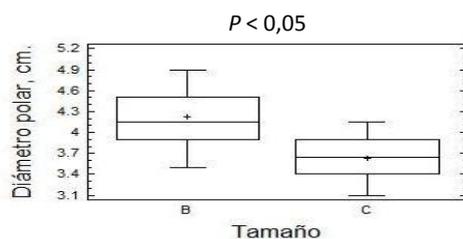


Figura A-37. Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad ‘Camino real’ “*grado de madurez*” 6.

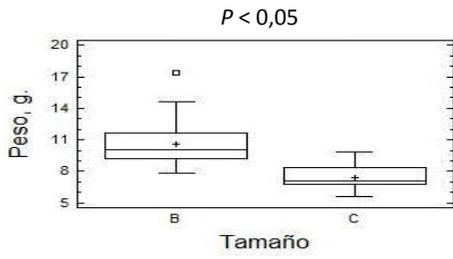


Figura A-38. Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad 'Camino real' "grado de madurez" 2.

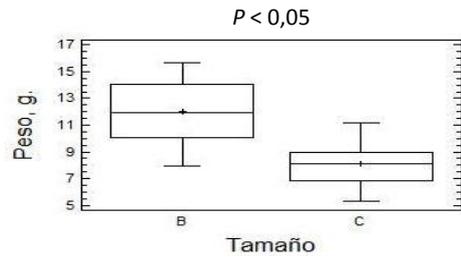


Figura A-39. Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad 'Camino real' "grado de madurez" 4.

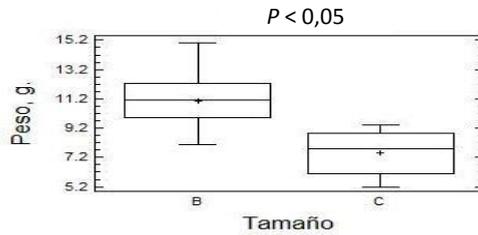


Figura A-40. Gráfica de los valores para el diámetro polar de fresas variedad 'Camino real' "grado de madurez" 6.

Anexo 7. Tablas ANOVAS para las variables de color L*, a*, b* y h* de fresas variedad ‘Sweet charlie’, tamaño B.

Tabla ANOVA para L* según “grado de madurez”
 Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	865,724	2	432,862	32,38	0,0000
Intra grupos	762,051	57	13,3693		
Total (Corr.)	1627,78	59			

Tabla ANOVA para a* según “grado de madurez”
 Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	427,09	2	213,545	14,47	0,0000
Intra grupos	841,264	57	14,759		
Total (Corr.)	1268,35	59			

Tabla ANOVA para b* según “grado de madurez”

Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	68,2194	2	34,1097	5,22	0,0083
Intra grupos	372,335	57	6,53218		
Total (Corr.)	440,554	59			

Tabla ANOVA para h según “grado de madurez”

Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	589,626	2	294,813	22,21	0,0000
Intra grupos	756,675	57	13,275		
Total (Corr.)	1346,3	59			

Anexo 8. Tablas ANOVAS para las variables de color L*, a*, b* y h* de fresas variedad ‘Sweet charlie’, tamaño C.

Tabla ANOVA para L* según “grado de madurez”

Análisis de la Varianza					
Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	1091,73	2	545,865	29,85	0,0000
Intra grupos	1005,83	55	18,2878		
Total (Corr.)	2097,56	57			

Tabla ANOVA para a* según “grado de madurez”

Análisis de la Varianza					
Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	1188,03	2	594,016	29,39	0,0000
Intra grupos	1111,78	55	20,2142		
Total (Corr.)	2299,81	57			

Tabla ANOVA para b* según “grado de madurez”

Análisis de la Varianza					
Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	109,955	2	54,9776	5,68	0,0057
Intra grupos	532,479	55	9,68143		
Total (Corr.)	642,434	57			

Tabla ANOVA para h según “grado de madurez”

Análisis de la Varianza					
Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	1227,02	2	613,509	28,75	0,0000
Intra grupos	1173,59	55	21,338		
Total (Corr.)	2400,61	57			

Anexo 9. Tablas ANOVAS para las variables de color L*, a*, b* y h* de fresas variedad 'Festival', tamaño B.

Tabla ANOVA para L* según "grado de madurez"
 Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	2790,5	2	1395,25	146,99	0,0000
Intra grupos	683,422	72	9,49197		
Total (Corr.)	3473,92	74			

Tabla ANOVA para a* según "grado de madurez"
 Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	624,24	2	312,12	300,46	0,0000
Intra grupos	74,7942	72	1,03881		
Total (Corr.)	699,034	74			

Tabla ANOVA para b* según "grado de madurez"
 Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	1287,78	2	643,891	151,70	0,0000
Intra grupos	305,595	72	4,24437		
Total (Corr.)	1593,38	74			

Tabla ANOVA para h según "grado de madurez"
 Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	75,8412	2	37,9206	61,04	0,0000
Intra grupos	44,7268	72	0,621206		
Total (Corr.)	120,568	74			

Anexo 10. Tablas ANOVAS para las variables de color L*, a*, b* y h* de fresas variedad 'Festival', tamaño C.

Tabla ANOVA para L* según "grado de madurez"
Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	1535,21	2	767,604	42,34	0,0000
Intra grupos	1305,32	72	18,1295		
Total (Corr.)	2840,53	74			

Tabla ANOVA para a* según "grado de madurez"
Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	416,696	2	208,348	133,77	0,0000
Intra grupos	112,137	72	1,55746		
Total (Corr.)	528,833	74			

Tabla ANOVA para b* según "grado de madurez"
Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	870,798	2	435,399	69,38	0,0000
Intra grupos	451,86	72	6,27584		
Total (Corr.)	1322,66	74			

Tabla ANOVA para h según "grado de madurez"
Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	58,6126	2	29,3063	31,84	0,0000
Intra grupos	66,2729	72	0,920456		
Total (Corr.)	124,885	74			

Anexo 11. Tablas ANOVAS para las variables de color L*, a*, b* y h* de fresas variedad ‘Camino real’, tamaño B.

Tabla ANOVA para L* según “grado de madurez”

Análisis de la Varianza					
Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	11154,1	2	5577,05	450,34	0,0000
Intra grupos	891,65	72	12,384		
Total (Corr.)	12045,8	74			

Tabla ANOVA para a* según “grado de madurez”

Análisis de la Varianza					
Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	556,451	2	278,226	251,62	0,0000
Intra grupos	79,6115	72	1,10572		
Total (Corr.)	636,063	74			

Tabla ANOVA para b* según “grado de madurez”

Análisis de la Varianza					
Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	971,61	2	485,805	115,51	0,0000
Intra grupos	302,813	72	4,20574		
Total (Corr.)	1274,42	74			

Tabla ANOVA para h según “grado de madurez”

Análisis de la Varianza					
Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	76,2996	2	38,1498	36,44	0,0000
Intra grupos	75,3751	72	1,04688		
Total (Corr.)	151,675	74			

Anexo 12. Tablas ANOVAS para las variables de color L*, a*, b* y h* de fresas variedad ‘Camino real’, tamaño C.

Tabla ANOVA para L* según “grado de madurez”
 Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	10661,4	2	5330,71	300,95	0,0000
Intra grupos	1275,32	72	17,7127		
Total (Corr.)	11936,7	74			

Tabla ANOVA para a* según “grado de madurez”
 Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	330,897	2	165,449	184,58	0,0000
Intra grupos	64,5357	72	0,89633		
Total (Corr.)	395,433	74			

Tabla ANOVA para b* según “grado de madurez”
 Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	611,596	2	305,798	75,93	0,0000
Intra grupos	289,986	72	4,02758		
Total (Corr.)	901,582	74			

Tabla ANOVA para h según “grado de madurez”
 Análisis de la Varianza

Fuente	Sumas de cuad.	Gl	Cuadrado Medio	Cociente-F	P-Valor
Entre grupos	67,1496	2	33,5748	47,11	0,0000
Intra grupos	51,3118	72	0,712664		
Total (Corr.)	118,461	74			

Anexo 13. Diagramas de dispersión correspondientes a los valores de las variables de color de los grupos de fresas de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaño B y C, para los tres niveles de “grado de madurez”.

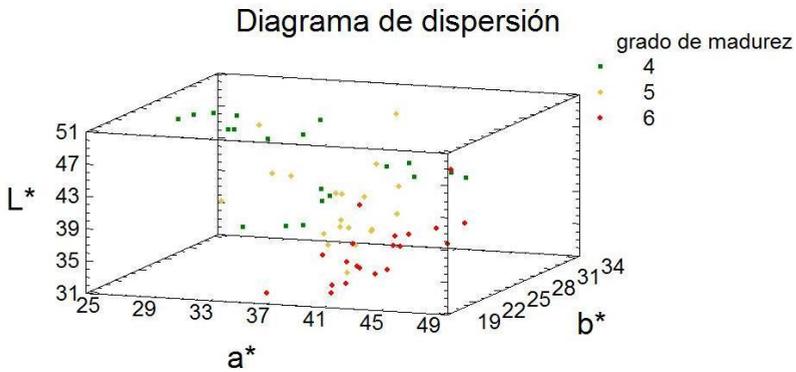


Figura A-41. Diagrama de dispersión correspondiente a los valores de las variables de color de los grupos de fresas con diferente “grado de madurez” de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaño B.

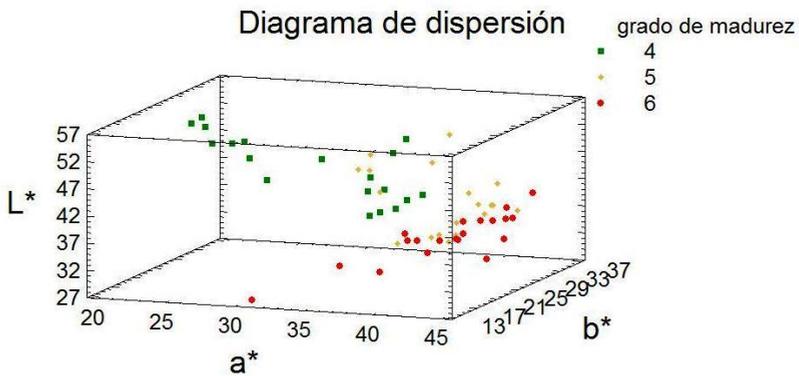


Figura A-42. Diagrama de dispersión correspondiente a los valores de las variables de color de los grupos de fresas con diferente “grado de madurez” de la variedad ‘Sweet charlie’, tamaño C.

Anexo 14. Diagramas de dispersión correspondientes a los valores de las variables de color de los grupos de fresas de la variedad ‘Festival’, tamaño B y C, para los tres niveles de “grado de madurez”.

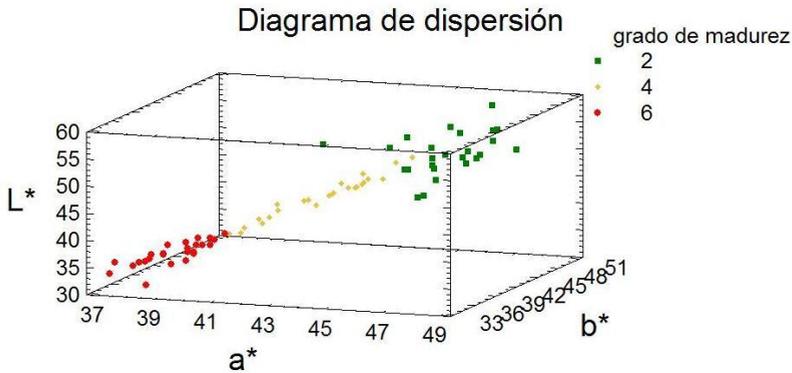


Figura A-43. Diagrama de dispersión correspondiente a los valores de las variables de color de los grupos de fresas con diferente “grado de madurez” de la variedad ‘Festival’, tamaño B.

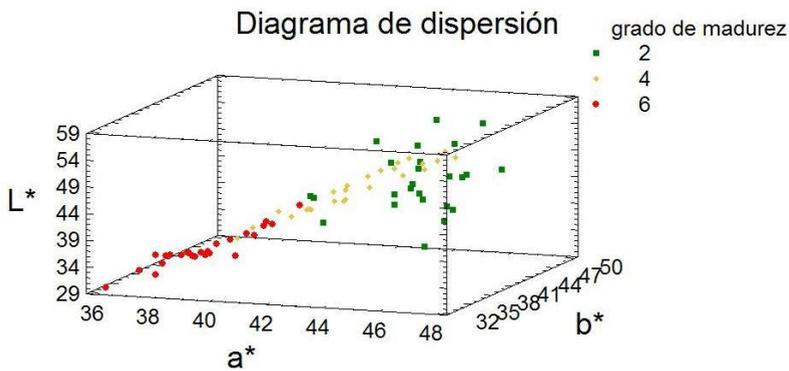


Figura A-44. Diagrama de dispersión correspondiente a los valores de las variables de color de los grupos de fresas con diferente “grado de madurez” de la variedad ‘Festival’, tamaño C.

Anexo 15. Diagramas de dispersión correspondientes a los valores de las variables de color de los grupos de fresas de la variedad ‘Camino real’, tamaño B y C, para los tres niveles de “grado de madurez”.

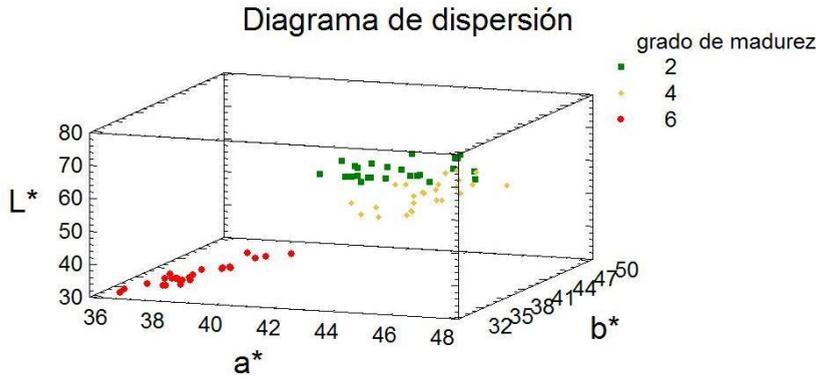


Figura A-45. Diagrama de dispersión correspondiente a los valores de las variables de color de los grupos de fresas con diferente “grado de madurez” de la variedad ‘Camino real’, tamaño B.

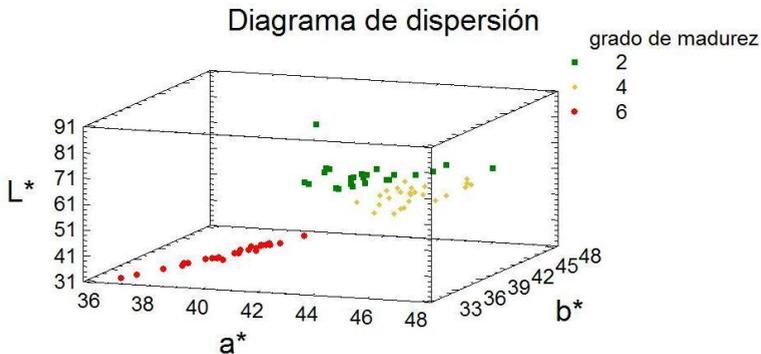


Figura A-46. Diagrama de dispersión correspondiente a los valores de las variables de color de los grupos de fresas con diferente “grado de madurez” de la variedad ‘Camino real’, tamaño C.

Anexo 16. Resultados del análisis discriminante, usando STATGRAPHICS® Plus, para las variables de impedancia.

<p>Fresas de la variedad ‘Sweet charlie’ tamaño B</p> <p>Variable de Clasificación: “<i>grado de madurez</i>” Variables independientes: Rs, CPE-T, CPE-P y Rp Número de casos completos: 60 Número de grupos: 3</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Discriminante Función</th> <th>Autovalor</th> <th>Relativo Porcentaje</th> <th>Canónica Correlación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,582445</td> <td>96,86</td> <td>0,60668</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,0188796</td> <td>3,14</td> <td>0,13612</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Funciones Derivado</th> <th>Wilks Lambda</th> <th>Chi-Cuadrado</th> <th>GI</th> <th>P-Valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,620224</td> <td>26,5109</td> <td>8</td> <td>0,0009</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,98147</td> <td>1,0380</td> <td>3</td> <td>0,7920</td> </tr> </tbody> </table>	Discriminante Función	Autovalor	Relativo Porcentaje	Canónica Correlación	1	0,582445	96,86	0,60668	2	0,0188796	3,14	0,13612	Funciones Derivado	Wilks Lambda	Chi-Cuadrado	GI	P-Valor	1	0,620224	26,5109	8	0,0009	2	0,98147	1,0380	3	0,7920	<p>Fresas de la variedad ‘Sweet charlie’ tamaño C</p> <p>Variable de Clasificación: “<i>grado de madurez</i>” Variables independientes: Rs, CPE-T, CPE-P y Rp Número de casos completos: 58 Número de grupos: 3</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Discriminante Función</th> <th>Autovalor</th> <th>Relativo Porcentaje</th> <th>Canónica Correlación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,819962</td> <td>74,51</td> <td>0,67122</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,28047</td> <td>25,49</td> <td>0,46801</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Funciones Derivado</th> <th>Wilks Lambda</th> <th>Chi-Cuadrado</th> <th>GI</th> <th>P-Valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,42911</td> <td>45,2633</td> <td>8</td> <td>0,0000</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,780963</td> <td>13,2267</td> <td>3</td> <td>0,0042</td> </tr> </tbody> </table>	Discriminante Función	Autovalor	Relativo Porcentaje	Canónica Correlación	1	0,819962	74,51	0,67122	2	0,28047	25,49	0,46801	Funciones Derivado	Wilks Lambda	Chi-Cuadrado	GI	P-Valor	1	0,42911	45,2633	8	0,0000	2	0,780963	13,2267	3	0,0042
Discriminante Función	Autovalor	Relativo Porcentaje	Canónica Correlación																																																				
1	0,582445	96,86	0,60668																																																				
2	0,0188796	3,14	0,13612																																																				
Funciones Derivado	Wilks Lambda	Chi-Cuadrado	GI	P-Valor																																																			
1	0,620224	26,5109	8	0,0009																																																			
2	0,98147	1,0380	3	0,7920																																																			
Discriminante Función	Autovalor	Relativo Porcentaje	Canónica Correlación																																																				
1	0,819962	74,51	0,67122																																																				
2	0,28047	25,49	0,46801																																																				
Funciones Derivado	Wilks Lambda	Chi-Cuadrado	GI	P-Valor																																																			
1	0,42911	45,2633	8	0,0000																																																			
2	0,780963	13,2267	3	0,0042																																																			
<p>Fresas de la variedad ‘Festival’ tamaño B</p> <p>Variable de Clasificación: “<i>grado de madurez</i>” Variables independientes: Rs, CPE-T, CPE-P y Rp Número de casos completos: 75 Número de grupos: 3</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Discriminante Función</th> <th>Autovalor</th> <th>Relativo Porcentaje</th> <th>Canónica Correlación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,41335</td> <td>82,73</td> <td>0,54080</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,0862884</td> <td>17,27</td> <td>0,28184</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Funciones Derivado</th> <th>Wilks Lambda</th> <th>Chi-Cuadrado</th> <th>GI</th> <th>P-Valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,651336</td> <td>30,2254</td> <td>8</td> <td>0,0002</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,920566</td> <td>5,8351</td> <td>3</td> <td>0,1199</td> </tr> </tbody> </table>	Discriminante Función	Autovalor	Relativo Porcentaje	Canónica Correlación	1	0,41335	82,73	0,54080	2	0,0862884	17,27	0,28184	Funciones Derivado	Wilks Lambda	Chi-Cuadrado	GI	P-Valor	1	0,651336	30,2254	8	0,0002	2	0,920566	5,8351	3	0,1199	<p>Fresas de la variedad ‘Festival’ tamaño C</p> <p>Variable de Clasificación: “<i>grado de madurez</i>” Variables independientes: Rs, CPE-T, CPE-P y Rp Número de casos completos: 75 Número de grupos: 3</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Discriminante Función</th> <th>Autovalor</th> <th>Relativo Porcentaje</th> <th>Canónica Correlación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,170676</td> <td>84,42</td> <td>0,38183</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,0314877</td> <td>15,58</td> <td>0,17472</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Funciones Derivado</th> <th>Wilks Lambda</th> <th>Chi-Cuadrado</th> <th>GI</th> <th>P-Valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,828132</td> <td>13,2951</td> <td>8</td> <td>0,1021</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,969474</td> <td>2,1856</td> <td>3</td> <td>0,5348</td> </tr> </tbody> </table>	Discriminante Función	Autovalor	Relativo Porcentaje	Canónica Correlación	1	0,170676	84,42	0,38183	2	0,0314877	15,58	0,17472	Funciones Derivado	Wilks Lambda	Chi-Cuadrado	GI	P-Valor	1	0,828132	13,2951	8	0,1021	2	0,969474	2,1856	3	0,5348
Discriminante Función	Autovalor	Relativo Porcentaje	Canónica Correlación																																																				
1	0,41335	82,73	0,54080																																																				
2	0,0862884	17,27	0,28184																																																				
Funciones Derivado	Wilks Lambda	Chi-Cuadrado	GI	P-Valor																																																			
1	0,651336	30,2254	8	0,0002																																																			
2	0,920566	5,8351	3	0,1199																																																			
Discriminante Función	Autovalor	Relativo Porcentaje	Canónica Correlación																																																				
1	0,170676	84,42	0,38183																																																				
2	0,0314877	15,58	0,17472																																																				
Funciones Derivado	Wilks Lambda	Chi-Cuadrado	GI	P-Valor																																																			
1	0,828132	13,2951	8	0,1021																																																			
2	0,969474	2,1856	3	0,5348																																																			
<p>Fresas de la variedad ‘Camino real’ tamaño B</p> <p>Variable de Clasificación: “<i>grado de madurez</i>” Variables independientes: Rs, CPE-T, CPE-P y Rp Número de casos completos: 75 Número de grupos: 3</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Discriminante Función</th> <th>Autovalor</th> <th>Relativo Porcentaje</th> <th>Canónica Correlación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>11,6912</td> <td>98,91</td> <td>0,95979</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,128988</td> <td>1,09</td> <td>0,33801</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Funciones Derivado</th> <th>Wilks Lambda</th> <th>Chi-Cuadrado</th> <th>GI</th> <th>P-Valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,0697925</td> <td>187,6871</td> <td>8</td> <td>0,0000</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,885749</td> <td>8,5532</td> <td>3</td> <td>0,0359</td> </tr> </tbody> </table>	Discriminante Función	Autovalor	Relativo Porcentaje	Canónica Correlación	1	11,6912	98,91	0,95979	2	0,128988	1,09	0,33801	Funciones Derivado	Wilks Lambda	Chi-Cuadrado	GI	P-Valor	1	0,0697925	187,6871	8	0,0000	2	0,885749	8,5532	3	0,0359	<p>Fresas de la variedad ‘Camino real’ tamaño C</p> <p>Variable de Clasificación: “<i>grado de madurez</i>” Variables independientes: Rs, CPE-T, CPE-P y Rp Número de casos completos: 75 Número de grupos: 3</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Discriminante Función</th> <th>Autovalor</th> <th>Relativo Porcentaje</th> <th>Canónica Correlación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>6,56924</td> <td>98,37</td> <td>0,93160</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,109</td> <td>1,63</td> <td>0,31351</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Funciones Derivado</th> <th>Wilks Lambda</th> <th>Chi-Cuadrado</th> <th>GI</th> <th>P-Valor</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,119129</td> <td>149,9924</td> <td>8</td> <td>0,0000</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,901713</td> <td>7,2938</td> <td>3</td> <td>0,0631</td> </tr> </tbody> </table>	Discriminante Función	Autovalor	Relativo Porcentaje	Canónica Correlación	1	6,56924	98,37	0,93160	2	0,109	1,63	0,31351	Funciones Derivado	Wilks Lambda	Chi-Cuadrado	GI	P-Valor	1	0,119129	149,9924	8	0,0000	2	0,901713	7,2938	3	0,0631
Discriminante Función	Autovalor	Relativo Porcentaje	Canónica Correlación																																																				
1	11,6912	98,91	0,95979																																																				
2	0,128988	1,09	0,33801																																																				
Funciones Derivado	Wilks Lambda	Chi-Cuadrado	GI	P-Valor																																																			
1	0,0697925	187,6871	8	0,0000																																																			
2	0,885749	8,5532	3	0,0359																																																			
Discriminante Función	Autovalor	Relativo Porcentaje	Canónica Correlación																																																				
1	6,56924	98,37	0,93160																																																				
2	0,109	1,63	0,31351																																																				
Funciones Derivado	Wilks Lambda	Chi-Cuadrado	GI	P-Valor																																																			
1	0,119129	149,9924	8	0,0000																																																			
2	0,901713	7,2938	3	0,0631																																																			

Anexo 17. Gráficas del comportamiento de los valores de firmeza obtenidos para cada uno de los “*grados de madurez*”.

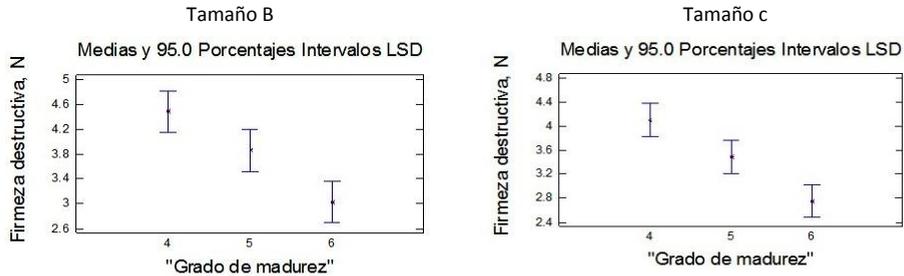


Figura A-47. Gráficas de los valores de la firmeza para fresas con diferente “*grados de madurez*” de la variedad ‘Sweet charlie’ tamaños B y C.

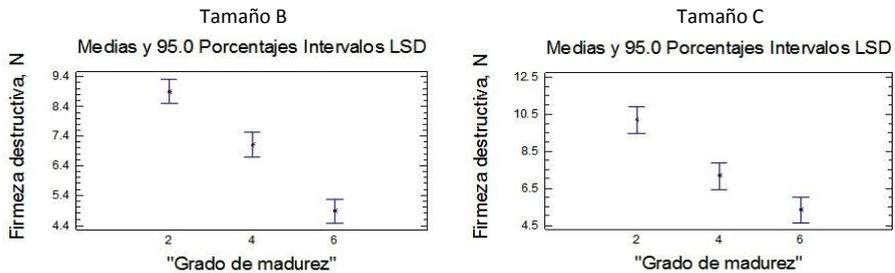


Figura A-48. Gráficas de los valores de la firmeza para fresas con diferente “*grado de madurez*” de la variedad ‘Festival’ tamaños B y C.

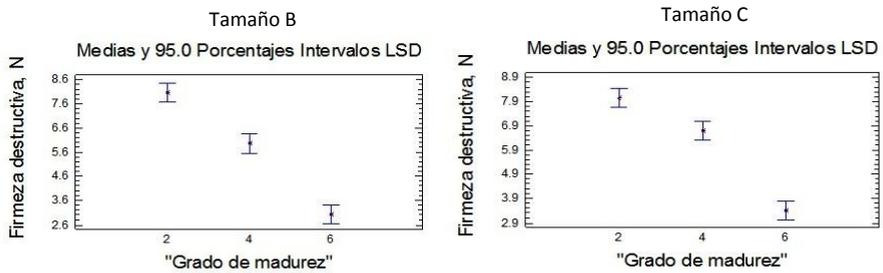


Figura A-49. Gráficas de los valores de la firmeza par fresas con diferentes “*grados de madurez*” de la variedad ‘Camino real’ tamaños B y C.

Anexo 18. Resultados de las pruebas para medir la repetibilidad del dispositivo

Tabla A-1.

Valores de las mediciones de impedancia para medir la repetibilidad del dispositivo.

MUESTRA	Rs	CPE-T	CPE-P	Rp	MUESTRA	Rs	CPE-T	CPE-P	Rp
1	174,2	1,79E-07	0,73112	6105	6	181,9	1,55E-07	0,7409	5720
	172,5	1,83E-07	0,72933	6113		180,8	1,55E-07	0,7408	5659
	172,9	1,79E-07	0,73092	6061		182	1,53E-07	0,74242	5637
	172,8	1,80E-07	0,73086	6068		183,1	1,50E-07	0,74382	5591
	174,6	1,77E-07	0,73249	6037		182,8	1,50E-07	0,74378	5581
valor medio	173,4	1,79434E-07	0,730944	6076,8	valor medio	182,12	1,52676E-07	0,742344	5637,6
2	198,6	1,48E-07	0,74517	5948	7	165,3	1,39E-07	0,75308	5752
	199,2	1,46E-07	0,74688	5864		166,4	1,37E-07	0,75436	5733
	197,2	1,51E-07	0,74387	5953		166,7	1,36E-07	0,75478	5727
	194,9	1,53E-07	0,74232	5943		166,3	1,37E-07	0,75447	5694
	196,3	1,52E-07	0,74346	5941		164,7	1,39E-07	0,75305	5733
valor medio	197,24	1,50006E-07	0,74434	5929,8	valor medio	165,88	1,3739E-07	0,753948	5727,8
3	169,1	1,81E-07	0,7344	6280	8	151,5	1,84E-07	0,73824	5526
	170,5	1,77E-07	0,73667	6201		152,9	1,79E-07	0,74041	5483
	166	1,89E-07	0,73056	6334		151,6	1,82E-07	0,73894	5488
	169,6	1,81E-07	0,73466	6232		154,3	1,74E-07	0,74298	5423
	167,7	1,84E-07	0,73297	6251		154,6	1,74E-07	0,7431	5422
valor medio	168,58	1,82616E-07	0,733852	6259,6	valor medio	152,98	1,78392E-07	0,740734	5468,4
4	180,5	1,79E-07	0,71477	9574	9	160,8	1,81E-07	0,74014	5815
	181,7	1,76E-07	0,71599	9532		161,5	1,78E-07	0,74164	5764
	181,6	1,77E-07	0,71557	9548		159,6	1,88E-07	0,73709	5878
	185,2	1,72E-07	0,71859	9444		160,4	1,84E-07	0,739	5845
	186	1,71E-07	0,71898	9466		159,5	1,84E-07	0,73861	5813
valor medio	183	1,74986E-07	0,71678	9512,8	valor medio	160,36	1,82986E-07	0,739296	5823
5	177,5	1,67E-07	0,74661	4460	10	198,1	1,53E-07	0,75287	4915
	179,5	1,63E-07	0,74911	4399		197,4	1,55E-07	0,75192	4940
	180,7	1,60E-07	0,75054	4378		195,2	1,60E-07	0,74889	4982
	178,3	1,67E-07	0,74694	4396		199,7	1,49E-07	0,75543	4910
	179,1	1,65E-07	0,74822	4374		199	1,49E-07	0,75504	4921
valor medio	179,02	1,6437E-07	0,748284	4401,4	valor medio	197,88	1,52982E-07	0,75283	4933,6
MUESTRA	Rs	CPE-T	CPE-P	Rp	MUESTRA	Rs	CPE-T	CPE-P	Rp
11	210,1	1,19E-07	0,79211	3807	16	232,6	1,12E-07	0,78892	4695
	207,5	1,19E-07	0,79258	3770		222,5	1,16E-07	0,7877	4514
	206,6	1,20E-07	0,79157	3750		218,8	1,14E-07	0,789	4377
	206	1,19E-07	0,79228	3733		215,9	1,56E-07	0,78846	4329

	205,3	1,20E-07	0,79216	3713		213,6	1,15E-07	0,78883	4250
valor medio	207,1	1,19296E-07	0,79214	3754,6	valor medio	220,68	1,22698E-07	0,788582	4433
12	215,2	1,08E-07	0,79729	4592	17	222,7	8,63E-08	0,81898	3958
	213,9	1,10E-07	0,79549	4615		220,7	8,62E-08	0,81931	3931
	213,1	1,08E-07	0,79718	4538		218,5	8,67E-08	0,81918	3919
	212,1	1,09E-07	0,79624	4556		217,2	8,64E-08	0,81958	3863
	211,4	1,08E-07	0,79752	4500		216,7	8,58E-08	0,82058	3830
valor medio	213,14	1,08572E-07	0,796744	4560,2	valor medio	219,16	8,62884E-08	0,819526	3900,2
13	209,3	1,25E-07	0,79455	3697	18	239,2	7,08E-08	0,8133	4528
	208,3	1,25E-07	0,79419	3681		237,5	7,07E-08	0,81372	4463
	207,6	1,23E-07	0,79573	3634		235,2	7,27E-08	0,81161	4492
	206,8	1,25E-07	0,79499	3635		233,6	7,26E-08	0,81188	4442
	205,9	1,26E-07	0,79413	3612		232,2	7,28E-08	0,8119	4412
valor medio	207,58	1,24828E-07	0,794718	3651,8	valor medio	235,54	7,19372E-08	0,812482	4467,4
14	221,8	1,24E-07	0,77853	4839	19	243,7	6,49E-08	0,82015	4445
	220,4	1,26E-07	0,77779	4827		241,2	6,51E-08	0,82052	4398
	219,2	1,26E-07	0,77763	4819		239,2	6,64E-08	0,81911	4407
	218,7	1,25E-07	0,77833	4790		237,7	6,66E-08	0,81913	4373
	217,7	1,27E-07	0,77746	4791		237,2	6,56E-08	0,82065	4331
valor medio	219,56	1,25562E-07	0,777948	4813,2	valor medio	239,8	6,57074E-08	0,819912	4390,8
15	247,6	9,06E-08	0,79443	5716	20	236,8	1,06E-07	0,79539	4172
	247,2	9,04E-08	0,79486	5693		235,9	1,04E-07	0,79689	4126
	246,8	8,91E-08	0,79605	5656		234,6	1,05E-07	0,79669	4108
	244,9	9,27E-08	0,79288	5693		234	1,03E-07	0,79864	4044
	244,4	9,17E-08	0,79384	5654		233,7	1,04E-07	0,79818	4050
valor medio	246,18	9,0911E-08	0,794412	5682,4	valor medio	235	1,04222E-07	0,797158	4100
MUESTRA	Rs	CPE-T	CPE-P	Rp	MUESTRA	Rs	CPE-T	CPE-P	Rp
21	262,7	9,61E-08	0,79108	4689	26	295,1	7,31E-08	0,81303	5849
	257	9,86E-08	0,78963	4618		283,5	7,39E-08	0,8134	5590
	253,5	9,67E-08	0,79194	4476		274,9	7,55E-08	0,81222	5428
	248,7	9,75E-08	0,79178	4392		268,7	7,50E-08	0,81346	5256
	244,4	1,02E-07	0,78839	4400		262,9	7,50E-08	0,81399	5104
valor medio	253,26	9,8273E-08	0,790564	4515	valor medio	277,02	7,45E-08	0,81322	5445,4
22	257,6	9,59E-08	0,8096	4429	27	268,7	8,28E-08	0,81331	4573
	250	9,85E-08	0,80739	4360		262,6	8,26E-08	0,81388	4465
	246	9,88E-08	0,8078	4278		257,6	8,17E-08	0,81549	4333
	242,8	9,86E-08	0,80824	4206		254	8,31E-08	0,81449	4280
	239,7	9,91E-08	0,80818	4152		250,3	8,32E-08	0,81485	4202
valor medio	247,22	9,81664E-08	0,808242	4285	valor medio	258,64	8,26976E-08	0,814404	4370,6
23	243,8	9,13E-08	0,81114	4045	28	233,1	7,83E-08	0,8162	4404

	238,6	8,97E-08	0,8127	3959		229,4	8,05E-08	0,81422	4382
	235,5	9,03E-08	0,81252	3896		225,9	8,14E-08	0,81387	4337
	232,5	9,31E-08	0,81043	3881		223,4	8,11E-08	0,81459	4267
	230,6	9,09E-08	0,81253	3802		221,3	8,00E-08	0,81586	4208
valor medio	236,2	9,10564E-08	0,811864	3916,6	valor medio	226,62	8,02578E-08	0,814948	4319,6
24	255,7	8,55E-08	0,80021	4332	29	258,2	1,09E-07	0,7832	4583
	252,7	8,49E-08	0,80102	4277		253,6	1,19E-07	0,77641	4656
	249,1	8,60E-08	0,80045	4238		255,7	8,52E-08	0,79009	9509
	246,5	8,43E-08	0,80235	4142		285,2	8,23E-08	0,79258	9560
	244,1	8,39E-08	0,80294	4087		254	8,39E-08	0,79159	9300
valor medio	249,62	8,4944E-08	0,801394	4215,2	valor medio	261,34	9,58086E-08	0,786774	7521,6
25	240,3	9,56E-08	0,7893	4511	30	226,9	8,63E-08	0,80217	4446
	237,9	9,51E-08	0,7898	4476		224,2	8,54E-08	0,80346	4328
	235,7	9,41E-08	0,79101	4391		221,7	8,64E-08	0,80284	4293
	233,6	9,48E-08	0,79057	4355		219,5	8,69E-08	0,80267	4241
	231,7	9,52E-08	0,79038	4332		217,9	8,61E-08	0,80364	4195
valor medio	235,84	9,49476E-08	0,790212	4413	valor medio	222,04	8,62294E-08	0,802956	4300,6

Anexo 19

$1/\tau$ es conocida como la frecuencia características del tejido o tiempo de relajación. τ se calcula a partir de:

$$\tau = [(R_0 - R_\infty)C]^{1/\alpha}, \quad (51)$$

Donde R_0 es la resistencia a bajas frecuencias (Ohmios), R_∞ es la resistencia a altas frecuencias (Ohmios), C la capacitancia (Faradios) y α es el coeficiente de dispersión (adimensional).