Biblioteca Digital
F C E N - U B A

BIBLIOTECA CENTRAL LUIS F LELOIR
BIBLIOTECA CENTRAL LELOIR
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES UBA

Tesis Doctoral

Textura y reología de tejidos vegetales minimamente procesados

García Loredo, Analía Belén

2011-12-20

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:
García Loredo, Analía Belén. (2011-12-20). Textura y reología de tejidos vegetales minimamente procesados. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Cita tipo Chicago:
García Loredo, Analía Belén. "Textura y reología de tejidos vegetales minimamente procesados". Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 2011-12-20.

EXACTAS UBA
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

UBA
Universidad de Buenos Aires

Dirección: Biblioteca Central Dr. Luis F. Leloir, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Intendente Güiraldes 2160 - C1428EGA - Tel. (++54 +11) 4789-9293

Contacto: digital@bl.fcen.uba.ar

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Industrias

Textura y reología de tejidos vegetales mínimamente procesados

García Loredo Analía Belén

Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en el área Química Industrial

Director de tesis: Dra. Stella Maris Alzamora

Director asistente: Dra. Sandra Guerrero

Consejero de estudios: Dra. Stella Maris Alzamora

Buenos Aires, 2011

Textura y reología de tejidos vegetales mínimamente procesados

El objetivo general de esta tesis fue investigar el efecto de los cambios ultra y microestructurales en las propiedades reológicas y texturales de tejido de fruta sometido a distintos procesos mínimos de conservación. Los productos vegetales estudiados fueron manzana y pera y los procesos estudiados consistieron en: a) tratamientos térmicos suaves y deshidratación osmótica a presión atmosférica con glucosa, con o sin el agregado de calcio, en tejido de manzana; b) aplicación de luz ultravioleta combinada con un pretratamiento antipardeamiento y aplicación de pulsos de luz combinada con un pretratamiento antipardeamiento en tejido de manzana; c) aplicación de luz ultravioleta y solución de peróxido de hidrógeno combinada con un pretratamiento antipardeamiento en tejido de pera.

Los cambios provocados tanto a nivel textural como reológico fueron importantes para el tejido de manzana escaldado y deshidratado osmóticamente (con o sin calcio) y se asociaron con pérdidas de crujencia, jugosidad, dureza y fracturabilidad, reflejado fundamentalmente en una disminución de los parámetros mecánicos, de los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') y un aumento en las capacitancias J_0, J_1, J_2 y $1/\eta_N$.

La irradiación con luz UV-C o LP en el tejido de manzana provocó leves cambios en las propiedades texturales y reológicas, en cambio el tejido de pera fue más sensible al efecto de la luz UV-C provocando una disminución en la dureza y la fracturabilidad, en los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') y un aumento en las capacitancias J_0, J_1, J_2 y $1/\eta_N$.

Los cambios observados en la textura y en las propiedades reológicas (a pequeñas y grandes deformaciones) de las muestras sometidas a los diferentes tratamientos pudieron ser correlacionadas con los cambios micro y ultraestructurales de los tejidos. Importantes correlaciones fueron encontradas entre los atributos texturales y las propiedades reológicas utilizando el análisis de regresión de cuadrados mínimos parciales.

La integración de los resultados permitió obtener una comprensión más clara de la relación entre la percepción de la textura, la reología y la estructura del mismo en alimentos mínimamente procesados, donde la textura es un atributo relevante.

Palabras claves: manzana, pera, deshidratación osmótica, tratamiento térmico, radiación UV-C, luz pulsada, reología, textura, estructura.

Texture and rheology of minimally processed fruits

This thesis was aimed to evaluate the effect of micro and ultrastructure changes on texture and rheological properties of fruit tissues subjected to different conservation processes. The studied fruits were apple and pear. Processes considered were: a) blanching and osmotic dehydration with glucose at atmospheric pressure, with or without calcium addition, in apple tissue; (b) UV-C radiation and pulsed light (PL) with an antibrowning pretreatment in apple tissue; (c) UV-C radiation with antibrowning and hydrogen peroxide pretreatments in pear tissue.

The changes in texture and rheological properties were significant in blanched and osmotically dehydrated (with or without calcium) apple tissue. These changes were associated with a loss of crispness, juiciness, hardness and fracturability, mainly reflected in lower values of mechanical parameters, storage modulus (G´) and loss modulus (G”); and an increase in J_0, J_1, J_2 and $1/\eta_N$ capacitances.

Irradiation of apple slices with UV-C or PL caused slight changes in texture and rheological properties, whereas pear tissue was more sensitive to UV-C irradiation leading to a decrease in hardness, fracturability, storage modulus (G´) and loss modulus (G”); and an increase in J_0, J_1, J_2 and $1/\eta_N$ capacitances.

Changes in texture and rheological properties of treated tissues were correlated with microstructure and ultrastructure features. Relevant correlations were found between texture attributes and rheological properties using partial least squares regression.

The integration of these results allowed obtaining a better understanding of the relationship between texture, rheology and structure of minimally processed fruits.

Keywords: apple, pear, osmotic dehydration, blanching, UV-C radiation, pulsed light, rheology, texture, structure.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos los que me acompañaron en este camino y de una manera u otra hicieron posible la realización de esta tesis.

A Stella y Sandra por el compromiso con el que trabajan, por el apoyo incondicional, por la dedicación que me brindaron contagiándome su entusiasmo y por su calidez humana. Muchas gracias.

A mis compañeros del laboratorio, Paula, Silvina, Marcela, Silvia, Mariana, Sebastián, Joaquín, por la ayuda, los consejos oportunos o simplemente por compartir un descanso y una charla amena. Quiero agradecer especialmente a Paula por su amistad que fue creciendo día a día.

A Andrea por su colaboración, apoyo profesional y sus consejos.

A Leticia por estar siempre dispuesta a darte una mano.

A todos los que participaron de las pruebas de evaluación sensorial y a quienes integraron el panel por dedicar su tiempo y esfuerzo en forma desinteresada, Peggy, Patricio, Flor, Silvina, Marcela, Sebastián, Silvia, Paula y Joaquín.

A la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, el CONICET y la Universidad de Buenos Aires por el aporte financiero brindando para la realización de esta Tesis.

A Nazareno por su apoyo, aliento y compañía.

A mi mamá por su apoyo incondicional y por estar siempre presente a pesar de la distancia.

Analía

A mi marido

A mi mamá

A mis sobrinos

1. OBJETIVOS…… 1
1.1. Objetivos generales…… 2
1.2. Objetivos específicos……...3
2. INTRODUCCIÓN…….. 5
2.1. Relación entre la textura, las características reológicas y la estructura de frutas……6
2.2. Procesamiento mínimo de frutas y vegetales…….....11
2.2.1. Introducción……11
2.2.2. Operaciones involucradas en los métodos de procesamiento mínimo estudiados en esta tesis……14
2.2.2.1. Tratamiento térmico – escaldado……14
2.2.2.2. Deshidratación osmótica……..15
2.2.2.3. Adición de calcio……18
2.2.2.4. Luz ultravioleta de onda corta……..... 18
2.2.2.5. Pulsos de luz de alta intensidad…….....22
2.2.2.6. Inmersión en soluciones antipardeamiento……..23
2.2.2.7. Inmersión en soluciones de peróxido de hidrógeno……26
2.3. Descripción del tejido vegetal……27
2.3.1. Estructura tisular……27
Sistema fundamental……28
Sistema vascular……29
Sistema dérmico……29
2.3.2. Estructura y componentes celulares……29
Núcleo…….. 30
Citoplasma……31
Organelas citoplasmáticas……32
Vacuola……33
Membranas celulares……33
Pared celular……34
2.3.2.1. Las pectinas y su interacción con el calcio…… 38
2.3.3. Manzana…… 40
2.3.3.1. Origen, taxonomía e importancia……..... 40

2.3.3.2. Variedad Granny Smith…….. 41
2.3.4. Pera.....43
2.3.4.1. Origen, taxonomía e importancia…… 43
2.3.4.2. Variedades comerciales de pera (*Pyrus communis*)……44
2.4. Caracterización de los tejidos vegetales……46
2.4.1. Evaluación sensorial……...46
2.4.1.1. Características de la sala de evaluación sensorial……48
2.4.1.2. Panel de evaluación sensorial……..48
2.4.1.3. Evaluación sensorial de la textura……... 49
2.4.1.4. Selección de los evaluadores para formar un panel de textura……54
2.4.1.5. Entrenamiento……..54
2.4.1.5.1. Uso de las escalas para evaluar textura…….55
2.4.1.5.2. Seguimiento y control de los evaluadores……56
2.4.2. Propiedades reológicas…….. 56
2.4.2.1. Comportamiento reológico de materiales alimenticios……. 57
2.4.2.2. Conceptos básicos…….. 58
2.4.2.3. Evaluación instrumental de las propiedades reológicas……. 60
2.4.2.3.1. Ensayos reológicas a bajas deformaciones…….. 60
Ensayo de fluencia y recuperación (rotatorio)……. 61
Ensayos oscilatorios……. 69
2.4.2.3.2. Ensayos reológicas a grandes deformaciones…….. 74
Ensayo de doble compresión (Análisis del perfil de textura)…….. 74
3. MATERIALES Y MÉTODOS……. 79
3.1. Materia prima……... 80
3.2. Preparación de las muestras…….. 80
3.3. Tratamientos……. 81
3.3.1. Tratamientos volumétricos……81
3.3.1.1. Tratamientos térmicos…… 81
3.3.1.2. Deshidratación osmótica con glucosa……. 81
3.3.1.3. Adición de calcio…… 83
3.3.2. Tratamientos superficiales……. 83

3.3.2.1. Aplicación de luz ultravioleta de onda corta…….. 83
3.3.2.1.1. Descripción del equipo…… 83
3.3.2.1.2. Tratamientos de radiación UV-C……. 84
3.3.2.2. Aplicación de pulsos de luz de alta intensidad…….…...85
3.3.2.2.1. Descripción del equipo…… 85
3.3.2.2.2. Tratamientos de irradiación con luz pulsada……... 86
3.3.2.3. Pretratamientos……86
3.3.2.3.1. Inmersión en soluciones antipardeamiento……...86
3.3.2.3.2. Inmersión en una solución de peróxido de hidrógeno (H_2O_2)……..87
3.4. Determinación de la actividad de agua……..87
3.5. Determinación del contenido de sólidos solubles……..88
3.6. Determinación del pH……88
3.7. Análisis sensorial…… 90
3.7.1. Análisis del perfil de textura sensorial…….. 90
3.7.1.1. Reclutamiento de evaluadores……....90
3.7.1.2. Selección de los evaluadores…….....91
a) Encuesta personal……91
b) Reconocimiento de gustos básicos……...92
c) Pruebas del triángulo……95
d) Reconocimiento fisiológico en textura…… 98
3.7.1.3. Entrenamiento de los evaluadores……...98
3.7.2. Evaluación con consumidores…….. 110
3.8. Medición de las propiedades reológicas……..111
3.8.1. Mediciones a bajas deformaciones……...111
3.8.1.1. Ensayos oscilatorios……...113
3.8.1.2. Ensayos rotatorios…….…….113
3.8.2. Mediciones a altas deformaciones. Análisis del perfil de textura instrumental 115
3.9. Técnicas microscópicas 117
3.9.1. Microscopía óptica 117
3.9.2. Microscopía electrónica de trasmisión……118
3.10. Análisis estadístico…… 118

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN……..120
4.1. Metodología de selección y entrenamiento para obtener un panel entrenado…… 121
4.1.1. Etapa de selección ……... 121
4.1.1.1. Reconocimiento de gustos básicos ……... 121
4.1.1.2. Prueba del triángulo secuencial …… 121
4.1.1.3. Reconocimiento fisiológico de textura……123
4.1.2. Etapa de entrenamiento…… 124
4.1.3. Calibración del panel……124
4.2. Correlación instrumental – sensorial de escalas de textura……126
4.2.1. Análisis instrumental de las escalas de textura…… ……126
4.2.2. Correlación entre el atributo sensorial y la propiedad instrumental……..…130
4.2.3. Validación externa de algunas correlaciones estudiadas……..134
4.2.4. Conclusiones del estudio de escalas sensoriales…….. 134
4.3. Efecto de los tratamientos en las propiedades reológicas, en la textura y en la estructura…….. 136
4.3.1. Tratamiento térmico…… 136
4.3.1.1. Propiedades reológicas…… 137
Ensayos oscilatorios……. 137
Ensayo de fluencia – recuperación…… 142
Ensayos de doble compresión …….. 148
4.3.1.2. Análisis sensorial……. 153
4.3.1.3. Correlación entre las propiedades reológicas y la textura utilizando regresión lineal de cuadrados mínimos parciales…… 155
4.3.1.3.1. Propiedades mecánicas (TPA)……... 155
4.3.1.3.2. Parámetros de fluencia…….. 158
4.3.1.4. Caracterización microestructural y ultraestructural…….. 161
4.3.2. Deshidratación osmótica combinada con escaldado…… 164
4.3.2.1.Propiedades reológicas……. 165
Ensayos oscilatorios ……. 165
Ensayo de fluencia – recuperación…… 169
Ensayos de doble compresión……... 174

4.3.2.2. Análisis sensorial……. 179
4.3.2.2.1. Análisis del perfil de textura……. 179
4.3.2.2.2. Prueba de diferencia contra control……... 182
4.3.2.3. Correlación entre las propiedades reológicas y la textura utilizando regresión lineal de cuadrados mínimos parciales…… 184
4.3.2.3.1. Propiedades mecánicas (TPA)……... 184
4.3.2.3.2. Parámetros de fluencia …….. 186
4.3.2.4. Caracterización microestructural y ultraestructural…….. 189
4.3.3. Deshidratación osmótica en presencia de calcio (con o sin escaldado previo)…… 195
4.3.3.1. Propiedades reológicas……. 196
Ensayos oscilatorios ……. 196
Ensayo de fluencia – recuperación…… 200
Ensayos de doble compresión …….. 206
4.3.3.2. Análisis sensorial ……. 210
4.3.3.2.1. Análisis del perfil de textura ……..... 210
4.3.3.2.2. Prueba de diferencia contra control …….. 212
4.3.3.3. Correlación entre las propiedades reológicas y la textura utilizando regresión lineal de cuadrados mínimos parciales…… 214
4.3.3.3.1. Propiedades mecánicas (TPA)…….. 214
4.3.3.3.2. Parámetros de fluencia…….. 217
4.3.3.4. Caracterización microestructural y ultraestructural……. 219
4.3.4. Integración de los resultados obtenidos a través de los ensayos reológicos, la evaluación sensorial de la textura y la caracterización microestructural y ultraestructura.....225
4.4. Efecto de los tratamientos de irradiación superficiales en las propiedades reológicas, en la textura y en la estructura…….. 230
4.4.1. Aplicación de luz ultravioleta de onda corta en el tejido de pera …….. 230
4.4.1.1. Propiedades reológicas……. 230
Ensayos oscilatorios…….. 230
Ensayo de fluencia – recuperación…… 235
Ensayos de doble compresión…… 240

4.4.1.2. Análisis sensorial de textura……. 244
4.4.1.3. Correlación entre las propiedades reológicas y la textura utilizando regresión lineal de cuadrados mínimos parciales……... 246
4.4.1.3.1. Propiedades mecánicas (TPA)…….. 246
4.4.1.3.2. Parámetros de fluencia…….. 248
4.4.1.4. Caracterización microestructural y ultraestructural……. 251
4.4.1.5. Integración de los resultados obtenidos a través de los ensayos reológicos, la evaluación sensorial de la textura y la caracterización microestructural y ultraestructura.....257
4.4.2. Aplicación de luz ultravioleta de onda corta en tejido de manzana…… 260
4.4.2.1. Propiedades reólogicas …… 260
Ensayos de doble compresión…… 260
4.4.2.2. Análisis sensorial de textura……. 265
4.4.2.3. Correlación entre las propiedades reológicas y la textura utilizando regresión lineal de cuadrados mínimos parciales…… 267
4.4.2.3.1. Propiedades mecánicas (TPA)…….. 269
4.4.2.3.2. Parámetros de fluencia…….. 272
4.4.2.4. Integración de los resultados obtenidos a través de los ensayos reológicos, la evaluación sensorial de la textura y la caracterización microestructural y ultraestructural……..... 274
4.4.3. Aplicación de pulsos de luz ultravioleta en tejido de manzana …….. 279
4.4.3.1. Propiedades reológicas ……279
Ensayos de doble compresión…… 279
4.4.3.2. Análisis sensorial de textura…… 284
4.4.3.3. Correlación entre las propiedades reológicas y la textura utilizando regresión lineal de cuadrados mínimos parciales…… 286
4.4.3.3.1. Propiedades mecánicas (TPA)……288
4.4.3.3.2. Parámetros de fluencia…….. 291
4.4.3.4. Integración de los resultados obtenidos a través de los ensayos reológicos, la evaluación sensorial de la textura y la caracterización microestructural y ultraestructural…….....294

4.5. Comparación entre los valores sensoriales predichos por los modelos (instrumental-sensorial) y los valores observados por el panel sensorial……. 297

5. CONCLUSIONES…… 299

5.1. Panel sensorial…… 300

5.2. Tratamientos volumétricos……. 300

5.3. Tratamientos superficiales…….. 301

5.4. Conclusiones generales……... 302

5. BIBLIOGRAFÍA……. 304

OBJETIVOS

1.1 Objetivos generales

Las frutas constituyen una categoría importante de alimentos en términos de consumo, contribución nutricional y funcional y atributos sensoriales.

La textura es uno de los más importantes pero menos entendidos atributos de calidad en frutas y vegetales. La complejidad de este atributo deriva de dos aspectos. Por un lado, la textura de un alimento tiene que ver con la percepción humana, tal como se deduce de la definición del estándar internacional ISO 5492 del año 1992: "…La textura está dada por todos los atributos mecánicos, geométricos y de superficie de un producto que se perciben por medio de receptores mecánicos, táctiles, y cuando corresponde, auditivos y visuales…". Por otro lado, las propiedades reológicas son una manifestación de la estructura de los materiales alimenticios, esto es, del ordenamiento espacial de los distintos elementos estructurales y de sus interacciones. En la estructura de los tejidos biológicos pueden distinguirse tres niveles crecientes de organización:

- el nivel molecular, que abarca los constituyentes químicos y las interacciones entre los polímeros;
- el nivel celular, que incluye la arquitectura celular y sus interacciones; y
- el nivel órgano, que se refiere a los arreglos de las células en tejidos, y es el que se analiza mediante ensayos sensoriales y reológicos.

El procesamiento de tejidos vegetales involucra modificaciones nano, ultra, micro y macroestructurales. Para avanzar en el conocimiento de los materiales alimenticios vegetales y entender sus propiedades, es necesario contemplar todos los niveles mencionados y reducir la escala de análisis a la de los elementos constitutivos y a la célula, comprendiendo cómo dichos materiales se forman, se transforman durante el procesamiento y se modifican y rompen en la boca.

Sin embargo, hasta la última década, la estructura ha sido una variable poco tenida en cuenta en la tecnología e ingeniería de alimentos. No existen en la bibliografía muchos estudios sobre la relación entre la estructura y la textura de tejidos vegetales procesados. Más aún, en muchos casos los resultados de los estudios sensoriales, instrumentales y estructurales son contradictorios. Ello puede atribuirse a la variabilidad biológica de la materia prima y a la diversidad de métodos instrumentales y de microscopía empleados, conjuntamente con un bajo

rigor estadístico y enfoques meramente cualitativos. Pero también, en la mayoría de los casos, debe considerarse que los cambios en un dado nivel estructural desatan una serie de cambios en los niveles superiores mediante procesos no lineales difíciles de correlacionar. Además, los alimentos vegetales están frecuentemente en un estado físico metaestable y/o exhiben actividad biológica y bioquímica, cambiando la estructura a lo largo del tiempo en forma ya sea perceptible o no.

El objetivo general de esta tesis fue investigar el efecto de los cambios ultra y microestructurales en las propiedades reológicas y texturales de tejido de fruta sometido a distintos procesos mínimos de conservación.

1.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos de esta tesis fueron:

- Estudiar el comportamiento reológico de frutas sometidas a distintos procesos de conservación mediante diferentes ensayos cuasiestáticos y dinámicos. Evaluar asimismo el efecto de la intensidad de los tratamientos cuando corresponda.

- Describir matemáticamente cuando sea posible las distintas curvas instrumentales (curvas de esfuerzo-deformación, curvas de fuerza-tiempo, curvas de fluencia, espectros de frecuencia) para obtener una descripción completa de la conducta mecánica y poder comparar los distintos productos/ tratamientos a través de los parámetros característicos.

- Estudiar la estructura de los tejidos mediante microscopía correlativa (microscopía óptica y microscopía electrónica de transmisión) a fin de obtener información sobre los cambios en los distintos aspectos/niveles de estructura

- Seleccionar y entrenar de un grupo de personas para formar un panel de textura.

- Evaluar sensorialmente las características texturales de los tejidos vegetales mediante un panel altamente entrenado.

- Integrar los resultados de los estudios microscópicos, instrumentales, y sensoriales con el objetivo de adquirir un mejor conocimiento de la relación estructura-funcionalidad mecánica-textura, y así contar con una base racional para optimizar las tecnologías de procesamiento.

- Evaluar cuando sea posible las correlaciones entre las propiedades reológicas y la textura y diseñar los modelos correspondientes.

Los productos vegetales estudiados fueron manzana y pera y los procesos estudiados consistieron en: a) tratamientos térmicos suaves y deshidratación osmótica a presión atmosférica con glucosa, con o sin el agregado de calcio, en tejido de manzana; b) aplicación de luz ultravioleta combinada con un pretratamiento antipardeamiento y aplicación de pulsos de luz combinada con un pretratamiento antipardeamiento en tejido de manzana; c) aplicación de luz ultravioleta y solución de peróxido de hidrógeno combinada con un pretratamiento antipardeamiento en tejido de pera.

1. INTRODUCCIÓN

2.1. Relación entre la textura, las características reológicas y la estructura de frutas

La textura es un atributo de calidad que es crítico para determinar la aceptabilidad de frutas y vegetales. Entendemos por *calidad* la combinación de las propiedades intrínsecas del alimento que lo diferencia del resto y por *aceptabilidad* la percepción de las personas y la reacción ante la combinación de estas propiedades.

Si bien el término textura es ampliamente utilizado, no es un atributo único, bien definido. Es un término colectivo que involucra las propiedades mecánicas y estructurales de un alimento y su percepción sensorial en la mano o en la boca (Abbott & Harper, 2004). La definición de textura según la norma IRAM 20013 del año 2001 expresa que "la textura está dada por todos los atributos mecánicos, geométricos y de superficie de un producto que se perciben por medio de los receptores mecánicos, táctiles y, cuando corresponde, auditivos y visuales". De esta definición se desprende:

- la textura es una propiedad sensorial que es percibida y descripta por los seres humanos;
- es un atributo multiparamétrico debido a que existen un gran número de términos que son utilizados para describirla;
- deriva de la estructura de los alimentos (molecular, microscópica o macroscópica); y
- es detectada utilizando varios sentidos.

Los atributos mecánicos están relacionados con la reacción del producto a una tensión e incluyen parámetros primarios (dureza, cohesividad, viscosidad, elasticidad y adhesividad) y parámetros secundarios (fragilidad, masticabilidad, gomosidad, pegajosidad, crocancia). Los atributos geométricos están relacionados con el tamaño, la forma y la orientación de las partículas (fibrosidad, granulosidad, aspereza), mientras que los atributos de superficie se relacionan con las sensaciones producidas por el contenido de humedad y el contenido de grasa (Szczesniak, 2002). Algunos de los términos usados para definir sensorialmente la textura de frutas son duros, firmes, blandos, crujientes, jugosos y arenosos entre otros.

Los atributos texturales están relacionados con las características bioquímicas, fisiológicas y estructurales de las células que componen los tejidos de las frutas. Estas características cambian a largo del tiempo y pueden ser alteradas durante el procesamiento

(Abbott & Harper, 2004). Si bien muchas veces cierto grado de ablandamiento es requerido para una óptima calidad de la fruta, el sobreablandamiento es indeseado y es un signo de senescencia o deterioro interno (Aked, 2002).

En los tejidos vegetales es importante poder identificar los elementos principales de su estructura para poder entender la textura y para determinar cuales de esos elementos son responsables de los cambios percibidos en la textura (Abbott & Harper, 2004). Por ejemplo, a veces es necesario evitar la zona fibrosa del tejido vascular cuando se desea evaluar la suavidad del tejido porque la presencia de una pequeña cantidad de fibra distorsionaría la medida real. En cambio, para otros vegetales como brócoli o espárragos, es importante determinar el grado de dureza de las fibras. Para resolver los problemas observados en la textura se requiere un completo entendimiento de la anatomía de los tejidos de frutas y vegetales, conocer la estructura de sus células y los cambios biológicos que ocurren en la postcosecha.

A nivel celular y del tejido, los principales factores estructurales que contribuyen a las propiedades texturales y reológicas del tejido vegetal son (Jackman y Stanley, 1992a; Waldron y col., 1997):

- La presión de turgor (es decir la presión externa que ejerce el fluido intracelular sobre la membrana celular);
- la rigidez de la pared celular;
- la adhesión célula-célula, determinada por la integridad de la laminilla media y los plasmodesmos.

Por lo tanto, el ablandamiento del tejido vegetal durante el procesamiento está atribuido principalmente a (Bourne, 1976; Lin y Pitt, 1986; Jackman y Stanley, 1992a; Sajnin y col., 1999; Alzamora y col., 2000):

- Cambios en los componentes de la pared celular, así como cambios en el espesor de la pared celular;
- cambios en las propiedades viscoelásticas de la pared celular, la laminilla media y la permeabilidad hidráulica del plasmalema;
- tamaño y forma de las células y espacios intercelulares;
- pérdidas de turgor.

El arreglo y el empaquetamiento de las células parenquimáticas (tejido comestible) dentro del tejido es otro factor que afecta las propiedades mecánicas del mismo. En el tejido de manzana las células son grandes (diámetros > 300 μm) y alargadas en la dirección radial; están organizadas en columnas bien definidas (Khan y Vincent, 1993a). Como resultado de la orientación de las células de manzana, cuando se lo comprime con orientación radial, la rigidez del tejido (módulo elástico) es más alta y la fuerza a la ruptura es más baja (Abbott y Lu, 1996). Hasta un 25 % del volumen del tejido de manzana puede ser ocupado por los espacios intercelulares (rellenos de gas) indicando un ineficiente empaquetamiento celular y un bajo grado de contacto célula-célula; ambos correlacionando negativamente con la rigidez del tejido (Vincent, 1989).

Los cambios producidos en la pared celular durante la maduración (solubilización y degradación de las pectinas, pérdida de azúcares no neutros y decrecimiento en la distribución del peso molecular de la hemicelulosa) de las frutas son críticos para la textura (Harker y col, 1997). La pared celular puede afectar la percepción de la jugosidad a través de su habilidad para mantener y liberar fluidos. En algunas frutas las paredes celulares se hinchan durante la maduración (Redgwell y col, 1997). Las paredes celulares hidratadas y la presencia de jugo libre sobre la superficie de células no dañadas puede ser la responsable de la sensación de jugosidad en frutas con texturas suaves (Harker y col, 1997).

La fuerza relativa de adhesión entre las células vecinas determinara el mecanismo de fractura del tejido. La ruptura celular esta generalmente asociada a un tejido jugoso y crujiente (fruto o vegetal inmaduro) mientras que la separación entre las células vecinas esta asociado a un tejido seco con textura indeseable (Harker y col, 1997). La separación entre células es un fenómeno que se observa en los tejidos escaldados tales como papa (Waldron y col, 1997) o zanahoria (Ng y Waldron, 1997). En los tejidos frescos, la adhesión celular es función de tres factores: la fuerza de la laminilla media, el área de contacto de las células y la extensión de las conexiones del plasmodesmo (Harker y col, 1997).

La evaluación de la textura es un paso clave en el desarrollo de nuevos productos o para la optimización de variables de proceso. En actualidad la textura de las frutas y vegetales puede ser evaluada de manera sensorial o instrumental a través de diferentes ensayos.

Las personas evalúan la textura de los tejidos de diferentes maneras: observándolo, manipulándolo con la mano, cortándolo, mordiéndolo y masticándolo. Muchos ensayos

sensoriales se han utilizado para evaluar textura, pero el más completo fue el Análisis del Perfil de Textura (TPA) desarrollado por un grupo de científicos del General Food Technical Center (Brandt y col, 1963). Los principales pasos de este método son: (1) selección de un grupo de personas para formar un panel; (2) entrenamiento del panel utilizando escalas estándares para los atributos texturales (Szczesniak y col, 1963); (3) evaluación textural del alimento utilizando las escalas de referencia. El TPA sensorial permite cuantificar y obtener descripciones completas de los atributos de textura que son percibidos en un alimento desde el momento que es manipulado por la mano hasta que es tragado (Bourne, 2004).

El método objetivo para evaluar la textura en alimentos sólidos es el texturómetro y para alimentos semi-sólidos el viscosímetro rotatorio. Hay algunos métodos no mecánicos tales como análisis acústicos o químicos que son utilizados para alimentos específicos. En las ultimas tres décadas el uso de los texturómetros adaptados a alimentos se volvió el método más utilizado (Bourne, 2004). El TPA instrumental fue uno de los desarrollos más importantes para evaluar la textura en alimentos sólidos. Una muestra de alimento es comprimida dos veces para simular las primeras dos masticadas (Friedman y col, 1963; Bourne, 1978, 2004). Con este método se obtienen más de seis parámetros texturales asociados a la muestra.

Las evaluaciones instrumentales de textura son preferidas ante las evaluaciones sensoriales en investigaciones o aplicaciones comerciales debido a la baja variabilidad entre las medidas comparada con las sensoriales, son más precisas, sencillas, rápidas, económicas y pueden proveer un lenguaje común entre investigadores, compañías, agencias regulatorias y clientes (Abbott y Harker, 2004). La relevancia de la medida instrumental depende de cuan bien predice el atributo sensorial (Voisey, 1971).

El continuo crecimiento internacional de la industria alimentaria promueve el uso de una terminología común y de escalas de referencia para poder controlar la calidad y las especificaciones de las propiedades sensoriales en los alimentos (Hough y col, 1994). Comprender la relación entre la percepción de la textura del alimento y la estructura del mismo es de suma importancia para los productos alimenticios donde la textura es un atributo relevante. Para poder establecer la relación entre la textura percibida y las características del alimento, es esencial entender el mecanismo de deformación o la reología del alimento (Peleg, 1987). Asimismo, resulta valioso disponer de escalas validadas con alimentos como referencia que sean de fácil adquisición en el mercado local.

Hough y col. (1994) construyeron 13 escalas estándar de referencia con alimentos argentinos. Los puntajes obtenidos por el panel entrenado para los alimentos de las escalas fueron similares en magnitud y dirección los asignados por el panel utilizando las escalas con alimentos de los Estados Unidos. En este trabajo no se especificó ninguna correlación con la medida instrumental.

En la literatura existe una gran controversia sobre las correlaciones instrumentales-sensoriales. Szczesniak y col. (1963) estudiaron las correlaciones instrumentales-sensoriales para algunos atributos sensoriales utilizando los alimentos de las escalas estándar de referencia y reportaron una relación no lineal para la dureza, la fracturabilidad y la viscosidad; y una relación lineal para la adhesividad al paladar y la masticabilidad. Para el caso de la viscosidad la relación fue no lineal utilizando una escala semilogarítmica. Es importante destacar que los resultados obtenidos de los ensayos mecánicos dependen del porcentaje de deformación, de la velocidad de compresión y de la forma de la muestra; y de las evaluaciones sensoriales del tipo de panel utilizado (entrenado o consumidores).

Meullenet y col. (1998) estudiaron las relaciones de algunos atributos texturales con 21 alimentos diferentes y encontraron altas correlaciones entre la evaluación sensorial e instrumental de la dureza ($r = 0,76$) y la elasticidad ($r = 0,83$); y correlaciones no significativas para la cohesividad y la masticabilidad. Además encontraron que los coeficientes de correlación entre los datos sensoriales e instrumentales (TPA) aumentaban utilizando transformaciones logarítmicas en los datos. Yuan y Chang (2006) utilizaron el TPA para obtener la dureza y la elasticidad instrumental en queso de soja obteniendo buenas correlaciones lineales, mientras que Di Mónaco y col (2008) estudiaron las correlaciones (sensorial-instrumental) para tres atributos (dureza, cohesividad y elasticidad) para 15 alimentos sólidos. Ellos reportaron que solo la dureza fue adecuadamente predicha utilizando una relación no lineal ($\%R^2 = 87,5$). Meullenet y Gross (1999) evaluaron seis atributos texturales de 24 alimentos diferentes utilizando un panel entrenado y un texturómetro (ensayo de doble mordida y ensayo de compresión). Buenas correlaciones fueron encontradas para la dureza, cohesividad y fracturabilidad mientras que pobres correlaciones fueron reportadas para la elasticidad, cohesividad de masa y masticabilidad.

Algunos estudios realizados en manzana encontraron relevantes correlaciones entre el atributo sensorial (firmeza y crujencia), y la medida instrumental incluyendo el TPA, la celda

de Kramer y la compresión uniaxial (Harker y col., 1997). Sin embargo, en la literatura existen algunas controversias entre la relación en la firmeza sensorial y las evaluaciones con el penetrómetro (Abbott y col, 1976; Bongers, 1992; Harker y col., 1996).

Chauvin y col, (2008) estudiaron algunas propiedades reológicas y texturales en manzana y pera. Ellos encontraron fuertes correlaciones entre el módulo elástico de tracción y el módulo de Guss con los atributos crujencia, dureza y fracturabilidad; y débiles correlaciones utilizando el método de Sinclair y el módulo elástico promedio obtenido por compresión en el tejido de pera. Además reportaron que pobres correlaciones fueron obtenidas para la jugosidad con las medidas instrumentales. Paoletti y col. (1993) encontraron altas correlaciones entre la arenosidad de la manzana y la cohesividad instrumental (r = -0,7) y la jugosidad (r = 0,74) de diferentes cultivares.

Abbott y col. (1984) estudiaron las relaciones instrumental – sensorial utilizando el TPA y encontraron que la combinación de las variables instrumentales a través de ecuaciones de regresión mejoraba la predicción del atributo sensorial que cuando se utilizaba solo la variable instrumental. La arenosidad fue el peor atributo ajustado, mientras que la crujencia y la dureza fueron los mejores representados. Harker y col. (1997) indicaron que la validez de un método instrumental para evaluar textura debería estar basado en cuan bien predice el atributo sensorial.

2.2. Procesamiento mínimo de frutas y vegetales

2.2.1. Introducción

Las frutas y vegetales mínimamente procesados (MP) se definieron en un principio como productos que mantienen sus atributos de calidad similares a la de los productos frescos. Estos productos MP deben mantener las características de frescura y a su vez deben proveer una vida útil conveniente, asegurando un nivel apropiado de inocuidad y de valor nutricional. Por lo tanto las operaciones de manipulación, de procesamiento y almacenamiento deben ser seleccionadas cuidadosamente (Palou y col., 2000).

Los consumidores son cada vez más exigentes en cuanto a los requerimientos en el desarrollo de las tecnologías de conservación de alimentos, deseando productos nutricionalmente saludables, frescos, de alta calidad (mejor sabor, olor, textura y apariencia), más naturales, con inocuidad química y microbiológica y que a su vez tengan una larga vida útil y sean fáciles de almacenar. Para satisfacer estas exigencias se debe utilizar procesamientos leves, disminuir el uso de aditivos artificiales, disminuir los contenidos de sal, grasa y azúcar y eliminar los microorganismos contaminantes de los alimentos (Barbosa-Cánovas y col., 2000). Por este motivo, en lugar de los métodos tradicionales de preservación de alimentos, se están utilizando técnicas combinadas de procesamiento mínimo en las cuales se aplican diferentes factores de estrés a los microorganismos (Mastrángelo y col., 2000).

Algunos de los factores usualmente utilizados para el diseño de los procesos combinados de preservación de fruta cortada por factores combinados son: lavado, tratamiento térmico suave (escaldado o llenado en caliente), leve reducción de la actividad de agua (a_w 0,93- 0,98) mediante la adición de solutos, control de pH (pH 3,0-4,1), adición de iones Ca^{2+}, y adición de conservadores (por ejemplo, sorbato de potasio, dióxido de azufre, etc.). Ninguno de estos factores usados individualmente a igual nivel sería letal para los microorganismos. Al no aplicarse un solo factor en forma severa sino una combinación de éstos en forma leve para evitar el desarrollo de los microorganismos y las alteraciones fisicoquímicas, se obtiene un producto final de mayor calidad con los mismos resultados en su calidad sanitaria (Alzamora y col., 1995; 2000).

Uno de los principales problemas que presentan las frutas y vegetales mínimamente procesados es su alto carácter perecedero. Durante las diferentes operaciones de preparación (pelado, cortado, pulpeado, etc.) a las que es sometido el producto se favorecen las reacciones de deterioro (respiración, transpiración, producción de etileno, deterioro enzimático) que reducen la calidad sensorial y nutricional, y limitan la vida. Por otro lado, el aumento del tiempo y la distancia entre el procesamiento y el consumo pueden contribuir al desarrollo de microorganismos patógenos. Algunos de los microorganismos patógenos asociados con los productos frescos incluyen a *Listeria monocytogenes*, especies de *Salmonella*, especies de *Shigella*, cepas enteropatogénicas de *Escherichia coli*, virus de la hepatitis A, etc. Las posibles fuentes de contaminación en estos productos pueden provenir de la contaminación presente en las frutas y verduras frescas, de los trabajadores de la planta, y del ambiente del procesamiento (Alzamora y col., 2000).

Se han propuesto tres iniciativas principales para lograr productos con procesamiento mínimo que mantengan una alta calidad (Alzamora & Salvatori, 2006):

- Optimización de los métodos de conservación tradicionales para mejorar la calidad sensorial, nutricional y microbiológica de los alimentos, el rendimiento y la eficiencia energética (extensión del concepto de procesamiento mínimo a las características de excelencia de productos procesados).
- El desarrollo de procesos leves mediante la combinación de factores tradicionales de preservación físicos y químicos, cada uno aplicado en baja intensidad, para conservar los atributos de calidad del estado fresco o nativo de un dado alimento pero con una mayor vida útil.
- El desarrollo de nuevas técnicas para obtener alimentos con atributos de calidad del estado fresco utilizando combinaciones de factores de preservación emergentes o combinaciones de factores emergentes con tradicionales, todos aplicados a bajas dosis.

Las tecnologías de preservación de alimentos pueden clasificarse según su modo de acción sobre los microorganismos (López-Malo y col., 2000):

- Disminución o inhibición del crecimiento microbiano utilizando factores tradicionales tales como baja temperatura, reducción de la actividad de agua (a_w), restricción de oxígeno, acidificación, fermentación, empaquetamiento en atmósferas controladas o modificadas, adición de antimicrobiano o compartimentalización de emulsiones de agua en aceite.

- Inactivación de microorganismos por calor, radiaciones ionizantes, altas presiones hidrostáticas, pulsos eléctricos, pulsos luminosos, campos magnéticos, ultrasonido o adición de enzimas (lisozima).
- Prevención de la entrada de microorganismos al alimento utilizando envasado o manejo aséptico, empaquetamiento, centrifugación o filtración.

2.2.2. Operaciones involucradas en los métodos de procesamiento mínimo estudiados en esta tesis

2.2.2.1. Tratamiento térmico - escaldado

El escaldado se aplica usualmente antes de la congelación, la deshidratación y la esterilización para destruir la actividad enzimática de frutas y verduras, causante de la formación de aromas y sabores desagradables y cambios de color y textura. En las tecnologías de procesamiento mínimo no sólo se aplica para inactivar enzimas, sino también para destruir o dañar por calor los microorganismos presentes (entre otros hongos y levaduras), reduciendo la carga microbiana inicial o sensibilizando a los sobrevivientes ante otros factores de estrés (Alzamora y col, 1995). El escaldado además remueve el aire intercelular y provoca un ablandamiento del tejido que en algunos vegetales resulta conveniente (Lewicki, 1998).

El tratamiento térmico a temperaturas mayores a las que el microorganismo produce, de acuerdo a su severidad y tiempo de aplicación, la inactivación o la lesión subletal del mismo. Se han identificado cuatro blancos principales relacionados al daño térmico letal y no letal: el DNA, el RNA y los ribosomas, las membranas citoplasmáticas y las enzimas específicas (Ma y col., 1992).

Los dos métodos de escaldado comercialmente más empleados son: 1) escaldado en atmósfera de vapor de agua saturado y 2) escaldado en un baño de agua caliente. El escaldado en vapor es normalmente el método de elección ya que evita las pérdidas excesivas de compuestos hidrosolubles como vitaminas, minerales y carbohidratos, aunque éste tenga mayores gastos de inversión que el escaldado en agua caliente (Fellows, 1994).

Si el alimento no se escalda se producen, durante el almacenamiento, cambios no deseados en su valor nutritivo y sus características organolépticas. Entre las enzimas

responsables de estos cambios se encuentran la lipooxigenasa (LOX), la peroxidasa (POD), la polifenoloxidasa (PPO), la poligalacturonasa (PG), y la clorofilasa.

Durante la etapa de preparación, el producto se somete a operaciones (lavado, pelado, cortado, etc.) que causan daños mecánicos a los tejidos, provocando ruptura celular, y produciéndose la liberación de las enzimas del tejido que pueden ponerse en contacto con sus sustratos. El pardeamiento enzimático es uno de los más importantes factores limitantes en la vida útil de los productos vegetales. Esta reacción oxidativa, en la que participan sustratos fenólicos, es catalizada por la enzima PPO en presencia de oxígeno atmosférico y está asociada con el aumento de concentraciones de derivados poliméricos de o-quinonas, que contribuyen a la formación de pigmentos marrones por la participación en reacciones de polimerización y condensación. Esta enzima no es estable al calor, y la inactivación térmica de la misma está contemplada en el proceso de escaldado (Ma y col., 1992; Garcia y Barrett, 2002; Lamikanra, 2002). La mayoría de los cambios de sabor y aroma en frutas y vegetales frescos y sin escaldar pueden correlacionarse con la actividad de la POD.

La adecuada inactivación de las enzimas requiere un calentamiento rápido hasta una temperatura determinada, el mantenimiento de ésta durante un tiempo necesario y un enfriamiento rápido hasta una temperatura próxima a la del ambiente. Los factores que determinan el tiempo de escaldado son: (1) el tipo de fruta o vegetal, (2) su tamaño, (3) la temperatura de escaldado, y (4) el sistema de calentamiento. Por ejemplo, se ha observado que en el tejido de banana se produce la inactivación de la PPO a 80 ºC después de 15 min de tratamiento (Galeazzi y Sgarbieri, 1978), mientras que en arvejas se necesitaron 29 min a 80 ºC ó 2,5 min a 90 ºC y solamente 1 min a 95 ºC (Krotov y col., 1971).

2.2.2.2. Deshidratación osmótica

El proceso de deshidratación osmótica (DO) está basado en un fenómeno natural y no destructivo de ósmosis a través de las membranas celulares o la piel de productos frutihortícolas (Torreggiani, 1995). Esta técnica permite reducir el contenido de humedad en trozos de frutas hasta un 50-60 % en base húmeda e incrementar el contenido de sólidos solubles. Si bien el producto obtenido no es estable para su conservación, su composición química permite obtener, después de un secado con aire caliente, una congelación, o a través

de métodos combinados, un producto final de buena calidad organoléptica, provocando mínimos daños por calor y menor decoloración de las frutas, incrementando la retención de volátiles y pigmentos, mejorando la calidad textural de los productos rehidratados y reduciendo la carga de agua en los procesos subsiguientes (Le Maguer y Yao, 1995).

En este proceso, cuando se lleva a cabo a presión atmosférica, la fruta se pone usualmente en contacto con una solución concentrada de sales, minerales y/o azúcares, y debido a diferencias de los potenciales químicos entre la fruta y la solución, se establece una doble transferencia de materia: un flujo de agua desde el producto hacia la solución – junto con sustancias naturales (azúcares, vitaminas, pigmentos) – y, en sentido opuesto, un flujo de solutos de la solución hacia la fruta.

La fuerza impulsora de la deshidratación osmótica consiste en la diferencia de potencial químico (μ) del agua entre la fruta y el medio que lo rodea. El potencial químico está a su vez directamente relacionado con la actividad del agua (a_w) ó la presión osmótica (π) a través de:

$$\mu = \mu^0 + RT \ln a_w \qquad \textbf{(2-1)}$$

$$\pi = (RT / V) \ln (1 / a_w) \qquad \textbf{(2-2)}$$

$$a_w = p / p_0 \qquad \textbf{(2-3)}$$

Donde: μ^0 es el potencial químico de referencia a la temperatura en cuestión, V es el volumen molar parcial del agua, p la presión de vapor del agua en la solución y p_0 la presión de vapor de agua pura a igual temperatura.

La solución circundante a la fruta debe poseer una actividad de agua (a_w) menor que la de la fruta. En aplicaciones industriales se suele colocar la fruta en contacto con soluciones muy concentradas de azúcares durante tiempos cortos sin esperar que la fruta llegue al equilibrio con la solución (Chirife, 1982).

Como consecuencia del tratamiento osmótico el producto pierde agua, gana sólidos solubles y reduce usualmente su volumen.

La deshidratación osmótica depende fuertemente de (Spiazzi y col., 2001):

- Condiciones de operación: temperatura, relación másica solución-producto y agitación,
- Concentración de la solución,

- Tipo de soluto de la solución: sales, moléculas de bajo o alto PM,
- Tipo de tejido celular del producto: estructura, compactación, contenido de sólidos solubles, espacio intercelular, etc.,
- Pretratamientos: térmicos, químicos.

La velocidad de intercambio de masa se incrementa con la temperatura, pero por encima de 45ºC se produce el pardeamiento enzimático y el deterioro del sabor y del olor. (Salvatori y Alzamora, 2000). Para minimizar el efecto de la dilución de la solución de inmersión por el agua proveniente de la deshidratación de la fruta, se suele utilizar una gran relación jarabe/ fruta. Una agitación adecuada favorece y por lo tanto acelera la transferencia de masa (Ponting y col., 1966).

Los azúcares de baja masa molar (glucosa, fructosa, sorbitol, etc.) favorecen la toma de azúcar por la alta velocidad de penetración de las moléculas (Torreggiani, 1995). Además, para la elección del agente osmótico se tiene que tener en cuenta que el mismo posea sabor agradable y que no sea tóxico (Ponting, y col., 1966).

Los estudios realizados por Salvatori y Alzamora (2000) revelaron que muestras de manzana llegaban a un equilibrio osmótico en igual tiempo cuando se trabajaba con soluciones de glucosa o sacarosa, pero la toma de solutos fue ligeramente superior en muestras tratadas con solución de sacarosa, y esto se debió a la menor capacidad de este azúcar para bajar la a_w.

La penetración de las sustancias osmoactivas como los azúcares es un proceso superficial. El azúcar penetra a una profundidad entre 2-3 mm mientras los cambios en el contenido de agua son observados a profundidades de 5 mm. La toma de la sustancia osmoactiva da como resultado una concentración de sólidos en las capas superficiales la cual provoca una resistencia adicional a la transferencia de masa (Bolin y col., 1983; Lewicki y col., 2000).

Además de los solutos ya mencionados, se puede incorporar a la solución componentes activos, antimicrobianos, etc. que cumplan un rol particular, para incrementar la vida útil y/o mejorar las características sensoriales y nutricionales (Mújica-Paz y col., 2003a y b).

Existen tres caminos para la transferencia de masa en los tejidos celulares: el transporte apoplástico (movimiento del material dentro del volumen extracelular, incluidas las paredes celulares); el transporte simplástico (transporte de material entre células vecinas a través de los

plasmodesmos) y el transporte a través de la membrana plasmática ó plasmalema (Le Maguer y Yao, 1995).

Algunos solutos no pueden migrar de manera activa dentro de las células, pero pueden simplemente penetrar dentro de los espacios intercelulares, pues existe una modificación de la permeabilidad y selectividad de la estructura del tejido debido a las condiciones de maduración y almacenamiento o pretratamientos térmicos y químicos (Torreggiani, 1995).

2.2.2.3. Adición de calcio

El agregado de calcio se lleva a cabo con el fin de mantener la integridad estructural de las membranas y las paredes celulares. Esto se logra mediante: (1) interacción del calcio con los polímeros de la pared celular, principalmente mediante entrecruzamientos con las pectinas de la laminilla media; (2) estabilización de la membrana celular por los iones de calcio; y/o (3) efecto del calcio sobre la presión de turgor (Mignani y col., 1995; Picchioni y col., 1995; Luna-Guzmán y Barrett, 2000).

Las uniones de calcio incluyen otros grupos funcionales además del grupo carbonilo. Existe una fuerte interacción entre los iones Ca^{2+} y otros átomos de oxígeno de las pectinas. También forma complejos con azúcares neutros o ácidos. Las uniones para formar pectato de calcio se disponen en la forma llamada "caja de huevo", en las cuales los iones calcio interactúan y se coordinan con el oxígeno de dos cadenas adyacentes (Van Buren, 1991; del Valle y col., 1998). Sin embargo McFeeters y Fleming (1991) han expresado la duda de que a bajos pH se produzca la formación de zonas de unión entre cadenas de pectinas adyacentes, ya que a esos pH los grupos ácidos se encuentran en forma no disociada y sugieren que la interacción Ca-pectina debe ocurrir por otro mecanismo.

Investigaciones de Luna-Guzmán y Barrett (2000) mostraron que el cloruro de calcio y el lactato de calcio poseen el mismo efecto sobre la firmeza inicial en muestras de melón, pero el lactato de calcio, a igual concentración (2,5%), resultó ser más eficaz en el mantenimiento de la firmeza de las muestras durante el almacenamiento.

2.2.2.4. Luz ultravioleta de onda corta

La luz ultravioleta forma parte del espectro electromagnético y se encuentra ubicada entre los rayos X y el espectro visible, abarcando un rango de longitudes de onda entre 100 y 400 nm (**Figura 2-1**).

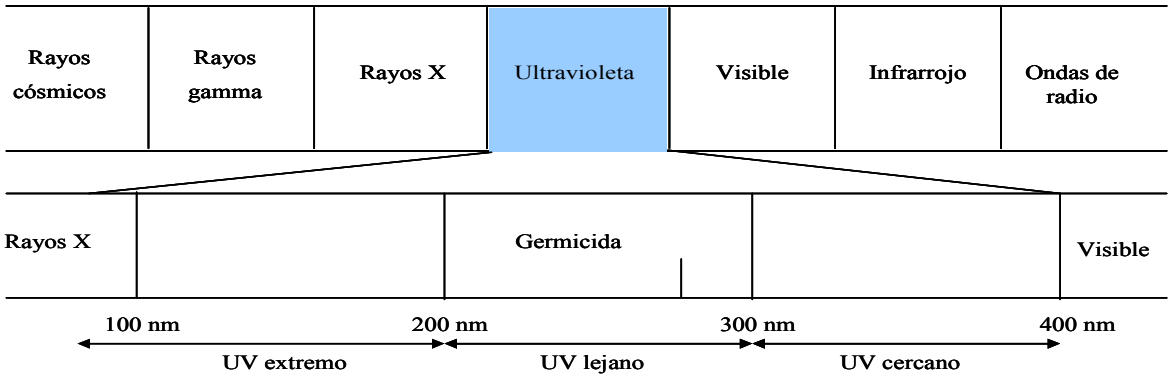


Figura 2-1. Espectro electromagnético**.** Adaptación extraída de Guerrero-Beltrán y Barbosa-Cánovas, 2004.

Esta radiación es frecuentemente referida como "no ionizante"; sin embargo, las longitudes de onda ultravioleta más cortas pueden llegar a originar cierto grado de ionización. Una subdivisión alternativa frecuentemente utilizada en la literatura divide la región ultravioleta en tres regiones: (Shama, 2006):

- Radiación ultravioleta de onda corta (UV-C): entre 200-280 nm
- Radiación ultravioleta de onda media (UV-B): entre 280-320 nm
- Radiación ultravioleta de onda larga (UV-A): entre 320-400 nm

La radiación UV-A provoca cambios en la piel y con lleva al bronceado de la piel. La radiación UV-B puede causar quemaduras en la piel y eventualmente cáncer. La radiación UV-C es la más dañina debido a que es absorbida por proteínas, ARN y ADN y puede provocar mutaciones en la célula, cáncer y/o muerte celular; también recibe el nombre de "rango germicida" debido a que es muy efectiva en la inactivación de muchos tipos de microorganismos tales como bacterias, virus, protozoos, hongos, levaduras y algas. (Bolton, 2001).

La medición de la dosis de radiación UV puede llevarse a cabo por diferentes métodos. Uno de ellos se basa en la medición con un **radiómetro**, aparato que consta de un dispositivo selectivo el cual permite separar la parte del espectro de emisión que se desea medir y un detector fotosensible que permite transformar la energía incidente en una medida de voltaje o corriente (Shama, 2007). Otra de las alternativas es la medición por **actinometría**. Esta técnica se basa en la medición de la luz UV incidente a través de una reacción fotoquímica, para la cual la cantidad de moléculas de producto formado por fotones absorbidos está bien establecida. Por lo tanto, un actinómetro es una reacción fotoquímica o sistema químico donde la eficiencia cuántica (rendimiento cuántico) es conocida. La medición del rendimiento químico después de la exposición a la luz permite conocer el flujo de fotones incidentes (Bolton, 2001).

La radiación UV-C ha sido ampliamente usada para la esterilización de superficies, utensilios, aire y materiales de empaque. También se utiliza para la desinfección de grandes cantidades de microorganismos en aguas potables y residuales (Gray, 1994; Shama, 1999; Bintsis y col, 2000; Bolton, 2001) y en la piscicultura (Summerfelt, 2003). Sin embargo, con los años ha crecido el interés en su aplicación como una tecnología de preservación de alimentos, por ser un proceso que posee destacadas ventajas:

- No afecta significativamente la temperatura del alimento, ni su contenido de humedad, y por lo tanto no causa daño térmico al producto
- No se requieren químicos consumibles
- No existe riesgo de sobredosis
- Tiene bajo consumo de energía
- No favorece la formación de sustancias extrañas
- No deja residuos químicos ni radioactividad residual en el producto (tal como ocurre con la radiación gama)
- No tiene restricciones legales
- No requiere equipamiento de seguridad adicional y es bastante seguro para el personal que maneja el equipo
- Es de fácil aplicación y no requiere personal especializado para su aplicación
- Tiene bajo costo de inversión, funcionamiento y mantenimiento
- Es eficiente para bacterias, hongos, levaduras y parásitos

En frutas y vegetales, la aplicación de la luz UV-C ha sido estudiada con dos objetivos. Uno de ellos es reducir la carga inicial de microorganismos en la superficie del producto, y el otro, es inducir una respuesta al estrés. La aplicación de la luz UV-C con este último propósito se denomina "**hormesis**". La hormesis puede ser definida como una respuesta beneficiosa de la planta que resulta de la aplicación de una dosis baja de un factor de estrés. Existen una variedad de tratamientos físicos, incluyendo la radiación UV-C, que pueden servir como factores de estrés. Las dosis óptimas para lograr efectos horméticos se encuentran en el rango entre 0,12 a 9 kJ/m^2. Este es un rango mucho más estrecho que el utilizado en la irradiación de alimentos para obtener efectos germicidas (Shama y Anderson, 2005; Shama, 2006).

Dentro de los efectos horméticos que se han reportado se encuentran la inducción de la síntesis de compuestos antifúngicos y el retraso de la maduración. En frutas cítricas se ha reportado un aumento de la resistencia a hongos atribuido a la acumulación de las fitoalexinas escaparona (Kim y col., 1991; D'hallewin y col., 1999) y escopoletina (D'hallewin y col., 2000) luego del tratamiento UV-C. La inducción de la formación de fitoalexinas estaría asociada con la estimulación de la producción de la enzima fenilalanina amonio-liasa (PAL). En tomates se ha reportado un retraso de la maduración asociado con un incremento de la concentración de poliaminas después de la aplicación de dosis bajas de radiación UV-C (Dibble y col., 1988; Stevens y col., 1998; Maharaj y col., 1999). Las poliaminas son policationes de bajo peso molecular que se acumulan en las plantas en respuesta al estrés ambiental. Estos compuestos estarían implicados en las primeras etapas del desarrollo de las frutas. La disminución de la concentración de poliaminas sería un factor desencadenante de la senescencia (Shama & Anderson, 2005). Otros de los efectos benéficos reportados por diversos autores en diferentes frutas y vegetales es el incremento de los niveles de compuestos antioxidantes y fitoquímicos (Vicente y col., 2005; González-Aguilar y col., 2007; Lemoine y col., 2007; Erkan y col., 2008).

En frutas y vegetales mínimamente procesados, la aplicación de la radiación UV-C se ha evaluado fundamentalmente con el propósito de inactivar microorganismos presentes en la superficie de estos productos. La irradiación UV-C fue efectiva para reducir la actividad microbiológica en rodajas de zucchinis (Erkan y col., 2001), lechuga mínimamente procesada (Allende y Artés, 2003), cubos de sandía (Fonseca y Rushing, 2006), en manzana verde

(Gomez y col, 2010) y en pera (Schenk y col., 2008). En melones cortados que fueron procesados bajo la luz UV-C, la irradiación no sólo produjo una disminución de microorganismos de deterioro tales como bacterias ácido lácticas y mesófilas, sino que también indujo una respuesta de defensa hipersensible que condujo a una disminución de la actividad respiratoria, un aumento de los niveles de peroxidasas (POD), una disminución de la actividad esterasa y lipasa, y una mayor retención de la firmeza a lo largo del almacenamiento (Lamikanra y col., 2005). Las reducciones decimales variaron entre las diferentes matrices y las dosis aplicadas, variando en un rango entre 0,5 y 5,5 ciclos logarítmicos de reducción.

Distintos estudios han reportado en frutas que el tratamiento con UV-C retrasa la perdida de la firmeza. La aplicación de dosis de 1 kJ/m^2 o 4 kJ/m^2 retraso el ablandamiento del tejido de frutilla (Baka y col., 1999; Pan y col., 2004). En tomate (Maharaj y col., 1999) y pepino (Vicent y col., 2005) se observó un retraso en la pérdida de firmeza después de irradiarlas utilizando una dosis de 3,6 kJ/m^2 y 7 kJ/m^2 respectivamente. Duraznos tratados con UV-C mantuvieron la firmeza igual al control (durazno fresco) y además acumularon altos niveles de poliaminas durante el almacenamiento (Gonzalez-Aguilar y col., 2004). En tomates irradiados, el retraso del ablandamiento del tejido se asoció con una pérdida de actividad de las enzimas de la pared celular tales como poligalacturonasa, pectinmetilesterasa, celulosa, xilamasa y β- galactosidasa (Barka y col., 2000).

2.2.2.5. Pulsos de luz de alta intensidad

La radiación con luz pulsada (LP) es una nueva tecnología destinada a la descontaminación de la superficie de alimentos mediante la aplicación de pulsos de corta duración y alta frecuencia de un amplio espectro, rico en luz UV-C. El espectro de emisión abarca longitudes de onda de la región ultravioleta al infrarrojo cercano (100-1100 nm). Los pulsos de luz son producidos usando tecnologías que multiplican la energía en varios órdenes. La energía es magnificada almacenando la electricidad en un capacitor sobre tiempos relativamente largos (fracciones de segundos) y liberándola en tiempos cortos (millones o centenares de fracción de segundo) (Gómez-López y col, 2007).

Esta tecnología ha recibido muchos nombres en la literatura científica: pulsos de luz UV-C (Sharma y Demirci, 2003), pulsos de luz de amplio espectro de alta intensidad

(Roberts y Hope, 2003), pulsos de luz (Rowan y col., 1999) y pulsos de luz blanca (Marquenie y col., 2003).

Hoornstra y col. (2002) estudiaron la inactivación de microorganismos presentes en la superficie de vegetales. Encontraron reducciones en el recuento aeróbico mayores a 1,6 log CFU/cm^2 en los diferentes vegetales evaluados utilizando una dosis de 0,30 J/cm^2. Gómez-López y col. (2005) reportaron una reducción en el recuento de mesófilos aeróbicos entre 0,56 y 2,04 log CFU/cm^2 en diferentes vegetales mínimamente procesados (espinaca, radicheta, lechuga, zanahoria, pimientos y repollo blanco) y en brotes de soja luego del tratamiento con más de 200 pulsos. Marquenie y col. (2003) reportaron una inactivación máxima de 3 a 4 unidades log de *Botritis cinerea* y *Monilinia fructigena* in vitro. Sin embargo, cuando se inoculó *B. cinerea* en frutillas la LP no fue efectiva para lograr su inactivación. Ozer y Demirci (2006) estudiaron la inactivación de *E. coli* O157:H7 y *L. monocytogenes* Scout A en filetes de salmón fresco utilizando una lámpara que generaba 5,6 J/cm^2 por pulso en la superficie de la lámpara y 3 pulsos por segundo. Trataron dos superficies diferentes, el lado de la piel y el del músculo. La reducción log máxima para *E. coli* O157:H7 fue de 1,09 sobre el lado del músculo y de 0,86 sobre lado de la piel, mientras que para *L. monocytogenes*, la máxima reducción log fue de 0,74 sobre el lado del músculo. Cuando los filetes de pescado fueron colocados más cerca de la lámpara y expuestos a tiempos de irradiación más altos presentaron un mayor sobrecalentamiento.

Alternaria alternate, A. niger, B. cinerea, Fusarium oxysporum, Fusarium roseum, Monilinia fructicola, Penicillium expansum, Penicillium digitatum, y Rhizopus stolonifer fueron totalmente o parcialmente eliminados de la superficie de las frutas cuando fueron tratados con LP (248 nm) (Laguna –Solar y col., 2006). Con la excepción de *A. niger*, la mayoría de los hongos fueron controlados con menos de 0,5 J/cm^2 en superficie de frutas. *A. niger* requiere de 1,9 J/cm^2 debido a la presencia del pigmento melanina que absorbe la luz UV-C. Estos autores observaron que el umbral de energía que causa daños en frutas es menor a 2 J/cm^2.

Un máximo de 4,3 y 2,9 reducciones logarítmicas para *Salmonella* y *E. coli* O157:H7 respectivamente fueron observadas para arándanos tratados con LP (22,6 J/cm^2 durante 60 segundos) (Bialka y Demirci, 2007).

2.2.2.6. Inmersión en soluciones antipardeamiento

Se conocen al menos cinco causas de pardeamiento en las frutas y vegetales procesados y/o almacenados: pardeamiento enzimático de fenoles, reacción de Maillard, oxidación de ácido ascórbico, caramelización y formación de polímeros pardos mediante la oxidación de lípidos (Pizzocaro y col. 1993).

En frutas y vegetales mínimamente procesados, el pardeamiento enzimático es una de los factores más importantes que limitan la vida útil de estos productos. Durante las diferentes etapas de preparación de las frutas y vegetales MP (pelado, corte, lavado), las células se rompen, lo que provoca que las enzimas se descomportamentalicen y entren en contacto con sus sustratos

El pardeamiento enzimático resulta de la acción de un grupo de enzimas denominadas polifenoloxidasas (PPO), las cuales se encuentran en todas las plantas, y se presentan en mayores cantidades en bananas, manzanas, peras, papas y duraznos. Estas enzimas catalizan la reacción de oxidación de los compuestos fenólicos a *o*-quinonas. La posterior oxidación y polimerización de las *o*-quinonas dan lugar a la formación de compuestos pardos (Garcia y Barrett, 2002). Las peroxidasas también están involucradas en reacciones de pardeamiento enzimático. Estas enzimas cuya principal función es oxidar compuestos dadores de hidrógeno a expensas de los peróxidos, son altamente específicas para el peróxido de hidrógeno pero pueden aceptar un amplio rango de dadores de hidrógeno incluyendo a los polifenoles. Los productos principales de la oxidación de fenoles son probablemente quinonas similares a aquellas obtenidas con las polifenoloxidasas. Aunque las peroxidasas están distribuidas ampliamente, especialmente en las plantas, por lo general parecen estar poco implicadas en el pardeamiento enzimático de frutas y hortalizas producido después de un estrés mecánico (Nicolas y col., 1994).

Para que ocurran las reacciones de pardeamiento enzimático se requiere: la presencia de PPO activa, oxígeno y sustratos fenólicos. La prevención del pardeamiento es posible, al menos temporalmente, a través de la eliminación de los sustratos, productos y/o la inhibición enzimática (Lamikanra, 2002).

El control del pardeamiento puede lograrse mediante el uso de diferentes tipos de compuestos químicos, generalmente denominados agentes antipardeamiento. En general, estos

agentes químicos son aplicados en soluciones, frecuentemente como formulaciones que contienen uno o más compuestos (Lamikanra, 2002).

Los diferentes tipos de compuestos químicos que se utilizan pueden actuar directamente como inhibidores de la PPO, generar un medio inadecuado para el desarrollo de la reacción de pardeamiento, o reaccionar con los productos de la reacción de la PPO antes de que éstos puedan conducir a la formación de compuestos pardos (Lamikanra, 2002).

Dentro de los compuestos que inhiben la actividad de la PPO, el dióxido de azufre es el más efectivo y ha sido utilizado en la industria de alimentos por muchos años. Sin embargo, los tratamientos con sulfitos pueden llegar a producir "flavors" indeseables como así también el ablandamiento de las frutas. Además su uso en alimentos ha sido restringido por la FDA debido a que puede presentar un riesgo de alergia para las personas asmáticas. Es por ello que se han investigado alternativas al tratamiento con sulfitos (Zhu y col., 2007).

El uso de compuestos químicos que disminuyan el pH del producto, o acidulantes, es una de las alternativas que se ha evaluado para el control del pardeamiento, ya que se ha visto que la actividad de la PPO disminuye a pH menores a 4,5. El acidulante más común es el ácido cítrico. Los acidulantes son frecuentemente utilizados en combinación con otros tipos de agentes antipardeamiento, debido a que resulta difícil lograr una inhibición eficiente del pardeamiento solamente a través del control del pH (Lamikanra, 2002).

Otros agentes antipardeamiento evaluados involucran compuestos reductores, quelantes y formadores de complejos. Los agentes reductores inhiben el pardeamiento al reducir los *o*-quinonas resultantes de la reacción de la PPO a *o*-difenoles, impidiendo la posterior oxidación de las *o*-quinonas que da lugar a la formación de compuestos pardos. Dentro de los agentes reductores se encuentran el ácido ascórbico y la cisteína. El ácido ascórbico no sólo tiene propiedades reductoras sino que también se ha visto que tiene un efecto inhibidor directo sobre la PPO (Whitaker, 1994). La cisteína presenta el problema que las cantidades requeridas para inhibir el pardeamiento pueden afectar negativamente el sabor del producto (Richard-Forget y col, 1992). Los agentes quelantes, como el EDTA, actúan formando quelatos con el cobre presente en el sitio activo de la PPO. Los agentes formadores de complejos, como las ciclodextrinas, atrapan los sustratos de la PPO o los productos de la reacción (Lamikanra, 2002).

Se ha reportado también que el cloruro de calcio es efectivo para inhibir el pardeamiento (Pointing y col., 1972; Gómez y col, 2010). Estos autores encontraron que la combinación de 1% ácido ascórbico y 0,1 % de cloruro de calcio fue efectiva para inhibir el pardeamiento superficial de manzanas cortadas y almacenadas en refrigeración. La acción inhibitoria del cloruro de calcio sería causada por el anión cloruro que actuaría inhibiendo a la PPO. Gorny y col. (1998) reportaron que la combinación de 2% ácido ascórbico y 1 % de cloruro de calcio fue efectiva para inhibir el pardeamiento superficial de peras cortadas. Dong y col. (2000) lograron inhibir el pardeamiento superficial de peras Anjou cortadas utilizando una solución de 1% ácido ascórbico y 1 % de cloruro de calcio, pero ellos observaron una pérdida de firmeza en el tejido tratado.

2.2.2.7. Inmersión en soluciones de peróxido de hidrógeno

Generalmente el desinfectante más utilizado para la sanitización de frutas y vegetales mínimamente procesados ha sido el cloro. Sin embargo, su efectividad está limitada a ciertos productos, ya que algunos constituyentes de los alimentos pueden reaccionar con el cloro y formar un producto potencialmente tóxico. Por esta razón la seguridad del cloro para ser usado en alimentos y tratamiento de aguas ha sido cuestionado y se comenzó a buscar otros reactivos alternativos para la sanitización inocua de alimentos, como el ozono (Crowe y col., 2007), el fosfato trisódico (Zuang y Beuchat, 1996) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) (Sapers y Sites, 2003).

El uso del peróxido de hidrógeno para sanitizar algunos alimentos como la leche, no fue en general aceptado por las agencias regulatorias porque era percibido como adulteración del alimento. Pero ha habido con los años una tendencia a re-examinar este punto de vista, ya que por su baja toxicidad creció su popularidad y usos en alimentos, cosmética, y en el campo de la medicina. El vapor del H_2O_2 también se ha comenzado a utilizar como agente esterilizante de equipamiento médico (Klapes y Vesley, 1990) y suministros para sistema de envasado aséptico (Wang y Toledo, 1986).

El H_2O_2 ha sido clasificado como sustancia GRAS (generalmente reconocida como segura) para ser usado en productos alimenticios como agente blanqueador, oxidante y reductor y como agente antimicrobiano. Se ha evaluado la utilización del H_2O_2 para sanitizar

huevos (Padron, 1995) y también se ha ensayado aplicándolo en microaerosol en la erradicación de bacterias patógenas en criaderos y gallineros (Neighbor y col., 1994). El H_2O_2 es un bactericida aprobado en los Estados Unidos desde hace más de dos décadas en el procesamiento de leche que se utilizará en ciertas variedades de queso (Kleyn, 1985). Además en ciertas preparaciones en donde el H_2O_2 es el componente activo está siendo usado como desinfectante de frutas y vegetales (Falik y col., 1994).

Schenk (2010) inoculó *E. coli* ATCC 11229 sobre rodajas de pera sin piel para luego tratarlas con una solución de H_2O_2 al 2% v/v con pH 3,0 y 4,2 durante 5 minutos; y con una solución de H_2O_2 al 3% v/v con pH 3,0 durante 5 minutos. Utilizando la primera solución encontró una reducción de 1,7 y 1,0 ciclos logarítmicos (pH 3,0 y 4,2 respectivamente); mientras que para la segunda solución se redujeron 2,5 ciclos logarítmicos sin causar signos de deterioro visibles. Utilizando tiempos mayores a 5 minutos observó deterioro y pérdida de material. Sapers y Sites (2003), aplicando H_2O_2 al 1% v/v a 20 ºC en manzanas inoculadas con *E. coli* ATCC 25922, obtuvieron una reducción de 2,8 y 2,9 ciclos logarítmicos pero con 15 y 30 minutos de exposición respectivamente, resultando en un tiempo muy prolongado para un producto mínimamente procesado.

2.3. Descripción del tejido vegetal

Los frutos usualmente se consideran como el órgano reproductivo de las plantas, conteniendo las semillas. Poseen generalmente alto contenido de azúcar, acidez relativamente elevada y perfume pronunciado. Los vegetales generalmente son reconocidos como las partes no reproductivas de las plantas, como las raíces, hojas o tallos. Sin embargo, la distinción entre frutas y vegetales no está del todo clara, y el uso común de los términos a veces no coincide con la clasificación botánica estricta (Edwards, 1999).

La estructura de una planta a toda escala es en su mayoría anisotrópica, heterogénea y no continua, y por lo tanto exhibe una considerable variabilidad en su construcción (Jackman y Stanley, 1995b).

2.3.1. Estructura tisular

Cada una de las distintas partes de la planta es un órgano de la misma, el cual está constituido por diferentes tipos de tejidos. Los tejidos pueden definirse como grupos de células estructural y/ó funcionalmente características. Los tejidos del cuerpo vegetal se clasifican según los tipos de células que los componen; según su función; según el lugar y modo en que se originan y según su estado de desarrollo. Los tejidos que se componen de un solo tipo de células se denominan tejidos simples, mientras que aquellos que se componen de dos ó más tipos de células reciben el nombre de tejidos complejos. El parénquima, la colénquima y el esclerénquima son tejidos simples, mientras que el xilema y el floema son complejos. Los principales tejidos de una planta se agrupan, según la continuidad topográfica, en tres sistemas de tejido: 1) el sistema fundamental; 2) el sistema vascular y 3) el sistema dérmico (Raven y col., 1992).

- **Sistema fundamental**

El sistema fundamental incluye los tejidos que forman el elemento básico de la planta y al mismo tiempo, muestran varios grados de especialización; éstos son parénquima, colénquima y esclerénquima, siendo el parénquima el más abundante.

Las células del tejido parenquimático se encuentran formando tejidos continuos en la corteza de los tallos y raíces, en el mesófilo de las hojas y en la pulpa de los frutos, además forman cordones verticales y horizontales en los tejidos vasculares. Las células parenquimáticas son típicamente células vivas, capaces de crecer y dividirse. Tienen diversas formas; con frecuencia son poliédricas, pero pueden ser estrelladas o muy alargadas. El parénquima está implicado en la fotosíntesis, el almacenamiento de nutrientes, la cicatrización de heridas, la regeneración de tejidos, la secreción y la formación de nuevos vástagos y raíces.

La parte comestible de la mayoría de las plantas está constituida por tejido parenquimático. Dependiendo del arreglo espacial y tamaño relativo de las células, el tejido tiene cantidades significativas (1-25 %) de espacios intercelulares llenos de aire que tienen un impacto considerable en las propiedades mecánicas (Jackman y Stanley, 1995b).

La colénquima y el esclerénquima son tejidos mecánicos de sostén de la planta. Las células de la colénquima aparecen en tallos, hojas, partes florales, frutos y raíces. La forma de las células varía desde prismática corta a muy alargada; generalmente tienen paredes

desigualmente engrosadas (Esau, 1982). La colénquima es plástico y se deforma irreversiblemente cuando crece el órgano en que se encuentra (Fahn, 1985). Las células del esclerénquima pueden desarrollarse en cualquier parte del cuerpo vegetal. Poseen paredes secundarias gruesas, a menudo lignificadas, por lo cual cumplen una función de refuerzo importante, así como de soporte. Son células muertas y se distinguen dos tipos celulares: esclereidas y fibras. Las esclereidas varían en forma desde poliédrica hasta alargada y pueden ser ramificadas. Las fibras generalmente son células largas y delgadas (Esau, 1982). Las células del esclerénquima tienen propiedades elásticas, al contrario que las del colénquima que son plásticas (Fahn, 1985).

- **Sistema vascular**

Está compuesto de dos tipos de tejidos conductores, el xilema (conductor de agua) y el floema (conductor de nutrientes). El xilema es un tejido complejo que consta de varios tipos de células, de las cuales las más importantes son los elementos traqueales (traqueidas y tráqueas), que son células muertas implicadas fundamentalmente en el transporte de agua e iones disueltos, pero además desempeñan en algún grado una función de sostén (Fahn, 1985). El floema también es un tejido complejo. Se encuentra en el cuerpo de la planta junto al xilema. Está relacionado con la conducción y el almacenamiento de nutrientes y con el sostén. (Esau, 1982). Las células fundamentales del floema son los elementos cribosos, que conducen los productos de la fotosíntesis. Estos elementos de tubo criboso están unidos por sus extremos (Fahn, 1985).

- **Sistema dérmico**

Se encuentra representado por la epidermis, la cubierta protectora más externa del cuerpo vegetal. Las células epidérmicas forman una capa continua densamente trabada en la superficie del cuerpo de la planta proporcionando una considerable protección mecánica. Por otro lado, pueden contener estomas, relacionados con el intercambio gaseoso, y otros tipos de células especializadas para funciones específicas. Las paredes de las células epidérmicas en las

partes aéreas están recubiertas por una cutícula que minimiza las pérdidas de agua y está formada mayoritariamente por cutina y cera (Raven y col., 1992).

2.3.2. Estructura y componentes celulares

La célula es la unidad fundamental de los organismos vivientes. La célula no debe considerarse como un cuerpo inalterable, sino como una unidad dinámica que sufre cambios, y realiza intercambios con el medio circundante. Por lo tanto, una célula es un sistema abierto que siempre se modifica, pero que, esencialmente es siempre el mismo.

Cada célula está constituida por una unidad que se encuentra dentro de la misma llamada protoplasma, el cual contiene en su interior diversas estructuras subcelulares y está rodeado por una frágil membrana semipermeable. Cada célula se encuentra aislada de otra célula por una pared y una membrana celular.

Considerando su grado de organización interna, se distinguen dos tipos básicos de células: procariontes y eucariontes. Las células eucariontes son características de plantas y animales, exceptuando las algas azules y las bacterias, poseen un núcleo limitado por una membrana y otras organelas, mientras que las procariontes carecen de endomembranas y de un núcleo verdadero (Curtis, 1985).

Una célula vegetal típica consta de una pared celular porosa y delgada, constituida por microfibrillas de celulosa embebida en una matriz integrada por hemicelulosa y pectina, que rodea un citoplasma delimitado por una membrana (plasmalema), un núcleo y una gran vacuola central, rodeada de otra membrana (tonoplasto) que la separa del citoplasma (**Figura 2-2**). La presencia de pared celular es la característica fundamental que la diferencia de la célula animal.

- **Núcleo**

El núcleo es el sitio de control de todas las actividades de la célula, actuando como unidad directora y organizadora de las mismas. Se encuentra conformado por una membrana nuclear, nucléolos, cariolinfa y cromosomas. La membrana nuclear está constituida por dos membranas paralelas porosas, separadas por un espacio de grosor variable, que permiten el

ingreso y egreso de macromoléculas. La membrana interna es un simple saco, pero la externa se continúa con el retículo endoplasmático. Los nucleolos son estructuras granulares, cuya función está asociada a la síntesis de ARN ribosomal. La cariolinfa es un líquido claro, incoloro, que se encuentra esparcido dentro del espacio nuclear. Los cromosomas son estructuras características de las células eucarióticas, que contienen el material genético celular en forma organizada, están formados por ADN y su forma varía según el período celular.

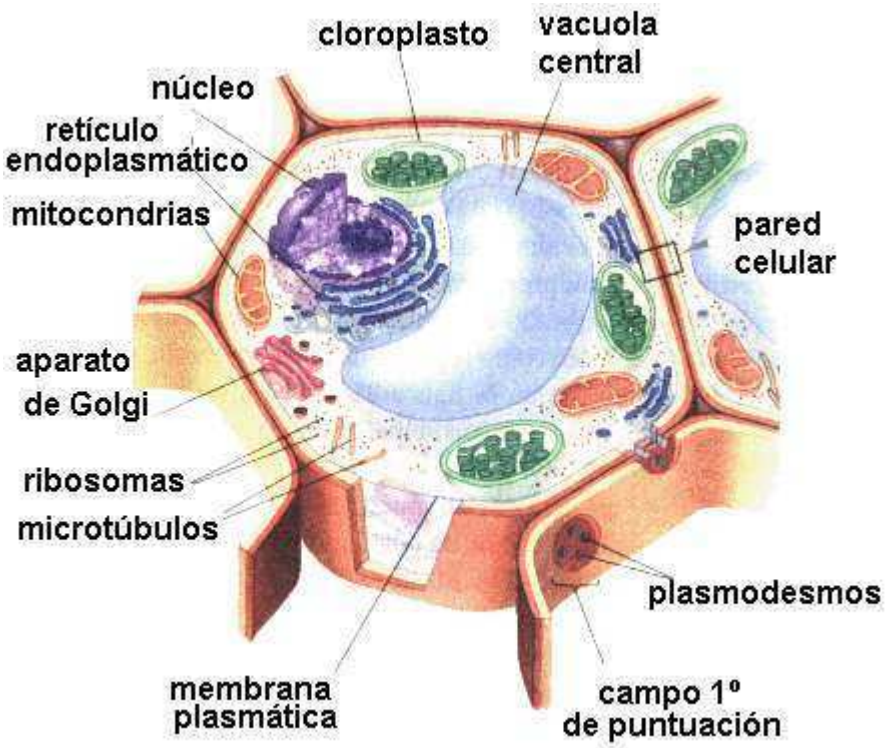


Figura 2-2. Esquema de una célula eucariota vegetal. Fuente: www.biología.edu.ar.

- **Citoplasma**

El citoplasma es una solución viscosa conformada mayormente por agua, que se encuentra en el protoplasma separado de la pared celular por una membrana denominada plasmalema, y de la vacuola por otra membrana llamada tonoplasto. En el mismo se encuentran embebidas una serie de estructuras membranosas llamadas organelas, cuyas funciones son fundamentales en el metabolismo celular. Comprende el retículo

endoplasmático, el aparato de Golgi, mitocondrias, ribosomas, plástidos, sustancias ergásticas, etc. (Fahn, 1985).

- **Organelas citoplasmáticas**

El ***retículo endoplasmático*** (RE) es una estructura tridimensional de membranas en forma de túbulos continuos plegados. Se encuentran recubriendo cavidades, sinuosidades y canales que corren a través de la célula. El RE rugoso (RER) presenta ribosomas adheridos a su superficie, mientras que el RE liso (REL) no. El RE comunica el núcleo con el citoplasma a través de sus membranas. En la célula vegetal, su función principal constituye la síntesis y procesamiento de proteínas, además de actuar como sistema de transporte intracelular

Los ***ribosomas*** son pequeñas partículas compuestas de ARN y proteínas que se encuentran en forma libre en el citoplasma, adheridas externamente a las membranas del RE, en el núcleo, los cloroplastos y/ó las mitocondrias. Están involucrados en la síntesis de proteínas.

El ***aparato de Golgi*** es un sistema de pilas de sacos circulares deprimidas, limitadas cada una por una membrana lisa. Está involucrado en el camino de secreción, recibiendo nuevamente proteínas y lípidos sintetizados en el RE, y actúa en el ensamblaje de los polisacáridos de la matriz de la pared celular.

Las ***mitocondrias*** son estructuras ovoides, membranosas, constituidas por proteínas y fosfolípidos. Constan de dos membranas, externa e interna; la interna forma invaginaciones dentro de la matriz, ambas poseen, en su superficie, miles de pequeñas partículas responsables de las actividades químicas de la mitocondria. La función principal de estas estructuras es la respiración celular, donde, mediante distintos procesos metabólicos, se encargan de extraer la energía de los enlaces químicos de los nutrientes que llegan a la célula.

Los ***plástidos*** existen en diferentes clases, las principales las constituyen los cloroplastos, cromoplastos y leucoplastos. En los cloroplastos predomina la clorofila y su función está ligada a la fotosíntesis; además del sistema de captación de luz, los cloroplastos contienen enzimas que son las responsables de la reducción del carbono del CO_2 a un azúcar simple. En los cromoplastos predominan pigmentos carotenoides. Los leucoplastos no poseen pigmentación, y actúan acumulando sustancias de reserva.

Las ***sustancias ergásticas*** son sustancias de reserva y materiales de desecho producidos por las células que no participan en el crecimiento de la misma. Entre éstas se encuentran resinas, gomas, alcaloides, almidón, algunas proteínas, aceites, etc.

- **Vacuola**

Puede ocupar hasta el 90 % del volumen de una célula madura. Es un compartimento rodeado por una membrana llamada tonoplasto, y está compuesta principalmente de agua en la cual están embebidas variadas sustancias orgánicas e inorgánicas tales como iones, azúcares, proteínas, ácidos orgánicos, taninos, flavonoides y otras sustancias. Su función principal es la de regular el contenido de agua y sustancias disueltas de la célula, regulando la presión osmótica, el almacenamiento de sustancias de reserva o la digestión, entre otras. Dentro de una célula puede existir más de una vacuola.

- **Membranas celulares**

Las membranas celulares están constituidas por una bicapa de fosfolípidos fluida con proteínas globulares asociadas que penetran de un lado o del otro de la membrana o se extienden enteramente a través de la misma, las cuales realizan la mayoría de las funciones y definen la especificidad de cada sistema de membrana. Los esteroides, como el colesterol, tienen un importante papel en la regulación de las propiedades físico-químicas de la membrana regulando su resistencia y fluidez. La bicapa lipídica actúa como una barrera de permeabilidad selectiva, lo que le permite seleccionar las moléculas que deben entrar y salir de la célula.

El modelo más aceptado para explicar la estructura de la membrana es el modelo de mosaico fluido propuesto por Singer y Nicolson (1972) (**Figura 2-3**). Este modelo describe la organización de lípidos y proteínas dentro de la membrana celular e ilustra como los rasgos mecánicos y fisiológicos de las membranas son definidos por las características físico-químicas de varios componentes moleculares.

La membrana citoplasmática ó plasmalema es una estructura que engloba a la célula, define sus límites y contribuye a mantener el equilibrio entre el medio intracelular y el

extracelular. La función básica de la misma es mantener el medio intracelular diferenciado del entorno. Esto es posible gracias a la naturaleza aislante en medio acuoso de la bicapa lipídica y a las funciones de transporte que desempeñan las proteínas. La combinación de transporte activo y transporte pasivo hacen de la membrana plasmática una barrera selectiva que permite a la célula diferenciarse del medio. De esta forma se mantiene estable el medio intracelular, regulando el paso de agua, iones y metabolitos, a la vez que mantiene el potencial electroquímico (haciendo que el medio interno esté cargado negativamente).

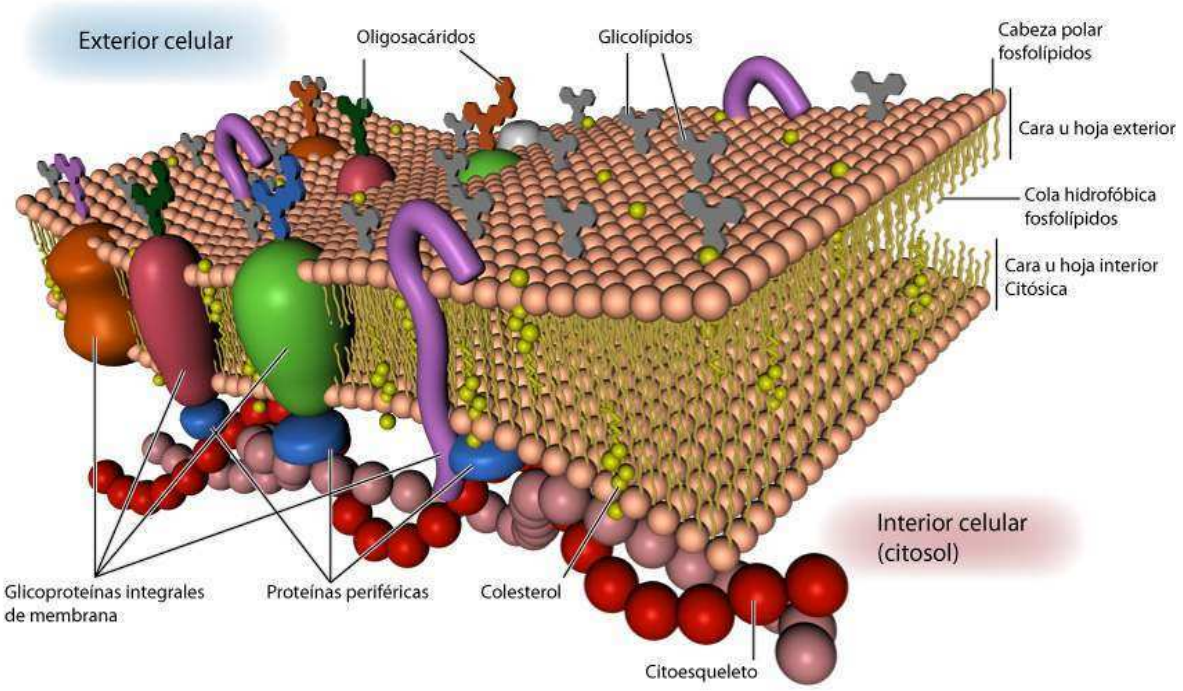


Figura 2-3. Esquema del modelo de mosaico fluido propuesto por Singer & Nicolson (1972).

- **Pared celular**

La pared celular se encuentra rodeando externamente al plasmalema. Es una estructura altamente organizada que contiene aproximadamente 65 % de agua y 35 % de diversos polisacáridos, proteínas y sustancias aromáticas. La composición y el arreglo molecular de los polímeros presentes en la pared difiere entre especies, entre tejidos de una misma especie, entre células individuales y también entre regiones de la pared que rodea a un solo protoplasto

(Carpita & Mc Cann, 2000). Es una estructura dinámica que cambia a lo largo de la vida celular.

La pared celular primaria nace durante la división celular y rápidamente incrementa su área superficial durante la expansión de la célula. La laminilla media forma la interfase entre las paredes primarias de las células vecinas. Finalmente, puede existir una diferenciación: algunas células elaboran dentro de la pared primaria una pared celular secundaria.

La pared está compuesta principalmente por tres estructuras independientes pero que interactúan entre sí: celulosa y hemicelulosas, pectinas y glicoproteínas (extensina).

La celulosa es el compuesto mayoritario de las paredes celulares. Está formado por largas cadenas lineales de D-glucopiranosas unidas por enlaces β (1→4), organizadas en forma de microfibrillas, en las cuales varias docenas de cadenas de glucosa se encuentran ensambladas unas a otras por enlaces hidrógeno a lo largo de su longitud. La fibrilla elemental es principalmente cristalina, por lo cual la pared celular es anisotrópica. Muchas de estas microfibrillas forman haces de microfibrillas que, al engrosarse, pueden verse con microscopio óptico (Fahn, 1985). La celulosa está asociada a hemicelulosas y sustancias pécticas. La hemicelulosa es un polímero rígido altamente ramificado en forma de varillas con azúcares neutros, como el xilano, xiloglucano y mezclas de glucanos β (1→3) o β (1→4) (Carpita & McCann, 2000). Son el componente principal de unión, y se unen fuertemente en una conformación lineal con las microfibrillas de celulosa a través de puentes hidrógeno.

Las glicoproteínas también están presentes en un 5-10 % de la masa seca en las paredes celulares. Se conocen varias de estas proteínas pertenecientes a la pared celular; la más conocida es la extensina, la cual es rica en hidroxiprolina. Las extensinas están uniformemente distribuidas a través de la pared celular, a la vez que se entrecruzan con otros polímeros de la pared celular, y, probablemente, con algunas pectinas, pero no están presentes en la laminilla media.

La lignina es un polímero de fenilpropanol de variado peso molecular que se encuentra incrustando las paredes de muchos tipos de células. Está presente tanto en las paredes celulares como en la laminilla media, pero la mayor concentración se encuentra en la pared secundaria, donde la polimerización y la formación del material que la compone ocurren a expensas del contenido de agua (Jackman & Stanley, 1995b).

Las sustancias pécticas son polímeros lineales de ácido galacturónico, que contienen un porcentaje variable de grupos carboxilo esterificados por radicales metilo. Se encuentran principalmente en las paredes celulares y los espacios intercelulares de los tejidos vegetales, observándose una alta concentración en la laminilla media, con una disminución gradual a medida que atraviesan la pared primaria hacia la membrana plasmática. Están conformadas fundamentalmente por unidades de ácidos D-galacturónico unidos por enlaces β (1→4); sin embargo, la cadena principal puede contener segmentos con abundantes restos de L-ramnosa, y también, en pequeñas cantidades, se pueden encontrar D-galactanos, L-arabinanos y arabinogalactanos. La presencia de estas sustancias (ramnosa, arabinosa y galactosa) en la cadena principal tiene como consecuencia una desviación de la cadena produciendo una especie de zig-zag. Por otro lado, parte de las pectinas está ligada a la celulosa, especialmente en las paredes celulares, bajo la forma de un complejo insoluble en agua llamado protopectina. El entrecruzamiento de las pectinas puede ocurrir como resultado de acoplamientos oxidativos con constituyentes fenólicos como el ferulato. Aunque más frecuentemente el entrecruzamiento de las cadenas helicoidales de homogalacturonanos de las pectinas desesterificadas puede ocurrir por unión por puentes de Ca^{2+}. Los grupos carboxilo de los restos galacturónicos pueden encontrarse esterificados en diferentes proporciones por grupos metilo y los grupos hidroxilo de las posiciones 2 y 3 pueden estar acetilados en pequeñas cantidades (Fennema, 1996).

Las pectinas contienen zonas parcialmente esterificadas, llamadas "lisas" (homogalacturonano), las cuales poseen poca o ninguna ramificación y zonas de distintos grados de polimerización y ramificaciones con alto contenido de azúcar neutro, llamadas "vellosas" (rhamnogalacturonanos, existen dos tipos I y II), las cuales a veces contienen ácido fenólico u otra cadena lateral que facilita el entrecruzamiento (Jackman y Stanley, 1995b). Las pectinas tienen varias funciones: controlan el tamaño del poro de la pared celular y proveen carga superficial, la cual regula el pH de la pared y el balance iónico; contribuyen a la adhesión célula-célula en la laminilla media; otorgan fuerza mecánica a la pared celular; y ayudan a moléculas de reconocimiento que alertan a las células de la planta de la presencia de organismos simbióticos, patógenos, e insectos (Carpita y McCann, 2000). La adhesión entre células requiere componentes presentes en la pared primaria que puedan unirse a las pectinas

de la laminilla media; estos componentes pueden ser las pectinas o las hemicelulosas (Van Buren, 1991).

La resistencia mecánica de la pared celular de las plantas depende de la orientación de las microfibrillas de celulosa, de las propiedades mecánicas, y de la unión entre las sustancias pépticas y las fibrillas de celulosa. El efecto en la firmeza debido a las pectinas en los tejidos involucran dos fenómenos separados: 1) en el tejido fresco, la formación de los grupos carboxilos libres incrementa la posibilidad y la fuerza de la unión del calcio entre polímeros de pectinas, y 2) en el tejido tratado térmicamente hay una combinación del incremento de uniones con calcio y una disminución en la susceptibilidad de las pectinas a la depolimerización por β-eliminación. En algunos tejidos como manzana y tomate, la disminución normal en el grado de metoxilación no está acompañada por la firmeza durante el almacenamiento. El ablandamiento durante el almacenamiento de frutas frescas está atribuido a la degradación enzimática y a la solubilización de las protopectinas (Thakur, 1997).

La pared contiene gran número de enzimas capaces de modificar la matriz de polisacáridos. Entre ellas se incluyen endoglucanasas (capaces de romper la cadena de la matriz de polisacáridos), glicosidasas (pueden remover cadenas laterales, permitiendo mayores interacciones entre las cadenas de polisacáridos), transglicosilasas (cortan polisacáridos y luego los unen), esterasas (permiten remover grupos metilos de las pectinas y rompen uniones éster entre las cadenas de polisacáridos) y peroxidasas (pueden formar o romper enlaces fenólicos en la pared). Todas estas enzimas pueden alterar la estructura de la pared y modular su expansión. La hidrólisis enzimática de la pared puede debilitarla físicamente, pero no induce la extensión de la misma (Cosgrove, 2001).

Otras enzimas presentes en la pared celular, las cuales son muy importantes durante el crecimiento ácido de la célula, son las expansinas; éstas inducen la extensión y la relajación de las paredes celulares aisladas. Estas enzimas son muy importantes en la conducta reológica durante el crecimiento de las paredes celulares. La diferencia esencial entre las células que están en la etapa de crecimiento y las que no, se observa en la capacidad de la pared celular para soportar esfuerzos de relajación y permitir la fluencia de sus polímeros. Las células que se encuentran en la etapa de crecimiento presentan dos propiedades: 1) el esfuerzo de relajación de las paredes exhibe un umbral de fluencia y por encima del mismo la velocidad de relajación es función de la fuerza de la pared ó de la presión de turgor (presión hidrostática

ejercida por el líquido intracelular sobre las membranas celulares). La fluencia de los polímeros de la pared celular se refiere a la dependencia con el tiempo de una extensión irreversible, debido al deslizamiento de los polímeros de la pared entre sí. El crecimiento se termina durante la maduración de la célula, es irreversible y es acompañado por el aumento de rigidez de la pared celular y por la pérdida de la expresión de la expansina (Cosgrove, 1997).

2.3.2.1. Las pectinas y su interacción con el calcio

Una terminología adecuada exigiría que únicamente se denominasen pectinas a las cadenas poligalacturónicas metiladas al 100%, y ácidos pectínicos, a los que contuviesen una proporción de metilación inferior; el término ácidos pécticos designa a los ácidos poligalacturónicos exentos de grupos metilo. Sin embargo en la práctica el término pectinas se emplea tanto para los ácidos pectínicos como para las pectinas propiamente dichas, pues las pectinas sólo se han logrado en laboratorio, no conociendo su existencia en la naturaleza (Cheftel & Cheftel, 1999). La longitud de la cadena es variable y puede incluir desde algunas unidades a varios centenares de ácido galacturónico. Las pectinas contienen zonas parcialmente esterificadas, llamadas lisas (homogalacturonano), las cuales poseen poca o ninguna ramificación y zonas de distintos grados de polimerización y ramificaciones con alto contenido de azúcar neutro, llamadas vellosas (ramnogalacturonanos I y II), las cuales a veces contienen ácido ferúlico u otra cadena lateral que facilita el entrecruzamiento (Jackman & Stanley, 1995b).

El grado de esterificación de las pectinas (GE) corresponde al porcentaje de unidades de ácido galacturónico esterificado por cada cien unidades de la cadena. Según su GE se pueden clasificar en dos grupos: pectinas de alto metoxilo (HM), si su GE es mayor al 50 %, y pectinas de bajo metoxilo (LM), si su GE es menor al 50 %. En frutas, la proporción de metilación varía según la especie, variedad y grado de madurez entre otros factores, siendo los siguientes algunos de los valores promedio: frutilla, 60 %; pera, 51 %; manzana, 72 % y mango 78 % (Van Buren, 1991). Según su GE, las pectinas poseen la propiedad de formar geles bajo distintas condiciones. Las pectinas HM gelifican en un medio con alto contenido de sólidos solubles, usualmente azúcar, en concentraciones > 50 % p/p, y en un rango de pH entre 2,0 y 3,5: si su GE es del 100%, formará geles con la sola presencia de azúcar. En cambio, las

pectinas LM pueden formar geles estables en ausencia de azúcar, pero requieren la presencia de cationes divalentes, como el calcio, para formar entrecruzamientos moleculares. Sin embargo, el agregado de 10-20% de sacarosa proporciona geles con mejores características de textura, más rígidos. Estas pectinas son menos sensibles a los cambios de pH.

Por otro lado, se conoce que la mayor parte del Ca^{2+} presente en los tejidos vegetales se localiza extracelularmente en la pared celular, en los pectatos de la laminilla media, en las membranas y, en menor medida, en algunos orgánulos celulares del tejido parenquimático como la vacuola (Val y col., 1999). En el interior de la célula, el calcio se encuentra en las vacuolas donde, dado el pH ácido de las mismas, puede precipitar como sales de oxalato, fosfato, carbonato, sulfato, etc., según las especies. Sin embargo, en el citosol, su concentración sigue siendo muy baja, pues si bien activa algunas enzimas, muchas otras son inhibidas frente a concentraciones de calcio superiores a 1 μm. En la pared celular, los grupos carboxilo de las pectinas pueden estar disociados y dar lugar a la formación de puentes de Ca^{2+}. El calcio es esencial para el mantenimiento de la estructura y el funcionamiento de las paredes y membranas celulares (Izumi & Watada, 1994). El mantenimiento de la estructura de la pared celular depende particularmente del enlace del calcio con los componentes pécticos de la lámina media (Poovaiah, 1986; Quiles y col., 2004). Se ha demostrado que cuando se agregan iones calcio en exceso, las moléculas de polipectatos forman dímeros en una conformación de "caja de huevo" en las cuales el calcio interactúa y se combina con los oxígenos de dos cadenas adyacentes formando los puentes de Ca^{2+}, neutralizando en un 50 % los grupos carboxilos. Sin embargo, si el GE es mayor del 40%, esta dimerización no ocurre (McFeeters, 1985). Cuando el grado de metilación de las pectinas es bajo, el calcio es un efectivo agente para mejorar la firmeza del tejido vegetal, formando en estas condiciones complejos insolubles. En presencia de este ion existe una tendencia al incremento de formación de gel cuando el GE decrece. Las uniones de calcio incluyen a otros grupos funcionales además del grupo carbonilo. Existe, por ejemplo, una fuerte interacción entre los iones Ca^{2+} y otros átomos de oxígeno de las pectinas; también forma complejos con azúcares neutros y con los ácidos orgánicos presentes naturalmente en la fruta.

En el tejido vegetal, aproximadamente el 90 % del calcio naturalmente presente en él está comprometido o en forma insoluble. Cuando los iones Ca^{2+} son desplazados por agentes quelantes, existe una pérdida de firmeza y solubilización de las pectinas. Por ejemplo, un

tejido vegetal en presencia de oxalato de amonio, ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), y/ó hexametafosfato de sodio presenta una marcada pérdida de la cohesividad. Esto demostraría que las uniones Ca^{2+}-pectina son los principales factores que contribuyen a la adhesión celular, actuando como un cemento intracelular que proporciona firmeza al tejido vegetal (Van Buren, 1991; Alonso y col, 1995). En este sentido, el cloruro de calcio se ha utilizado para mantener la firmeza de distintos alimentos, como en manzanas enteras (Sams y col., 1993), frutillas enteras y en láminas (Rosen & Kader, 1989; García y col., 1996) y en tomates cubeteados (Floros y col., 1992). El lactato de calcio se ha utilizado como agente potenciador de firmeza en frutillas (Morris y col., 1985; Main y col., 1986) y en uvas (Baker, 1993).

Además de contribuir a la adhesión célula-célula en la laminilla media y otorgar resistencia mecánica a la pared celular, por lo que son en gran medida responsables de la textura de frutas y hortalizas, las pectinas poseen otras funciones: son capaces de retener mucha agua y participan en la transferencia de agua en las plantas debido a que controlan el tamaño del poro de la pared celular, proveen carga superficial, la cual regula el pH de la pared y el balance iónico, y ayudan a moléculas de reconocimiento contra organismos simbióticos, patógenos, e insectos (Carpita & McCann, 2000).

2.3.3. Manzana

2.3.3.1. Origen, taxonomía e importancia

Los manzanos son los árboles frutales cultivados de mayor abundancia en las regiones templadas del planeta debido a su facilidad de adaptación a diferentes tipos de clima y suelos, su alto rendimiento, su valor alimenticio y por la calidad y diversidad de productos que se obtienen en la industria, tales como jugos, bebidas fermentadas, vinagres, jaleas, mermeladas, purés, conservas, deshidratados, etc. Este frutal pertenece a la familia de las *Rosáceas,* subfamilia *Pomoideas,* especie *Pyrus malus L.* Existen numerosas variedades cultivadas de esta especie, las cuales se clasifican de acuerdo con el color de su epidermis, y dentro de ella por su precocidad y características de la coloración (intensidad y tipo de color: liso o estriado) (Agustí, 2004). El origen de las mismas se remonta a la prehistoria; la mayoría provienen de la

variedad *Pumila* originaria de Europa central y oeste, aunque existen unas pocas pertenecientes a la variedad *Sylvestris* originaria del este y sur europeo y sudoeste asiático.

El árbol es de tamaño mediano, fuerte, con una masa foliar abundante. Sus flores son muy perfumadas. Normalmente presentan cinco pétalos redondeados de color blanco siendo rosado en el extremo inferior, un cáliz conformado de cinco sépalos puntiagudos, y veinte estambres. Su ovario presenta cinco lóculos, cada uno con dos óvulos. El receptáculo de la flor participa sólo en la formación de una pequeña parte basal del fruto. El fruto deriva de un ovario ínfero. El parénquima externo del fruto se origina a partir del hipanto (o tubo floral). Tanto el cáliz como los estambres persisten, en forma deshidratada, en el fruto.

Desde el punto de vista nutricional, la manzana es una de las frutas más completas y enriquecedoras en la dieta. Un 85% de su composición es agua, por lo que resulta muy refrescante e hidratante. Los azúcares, la mayor parte fructosa (azúcar de la fruta) y en menor proporción, glucosa y sacarosa, de rápida asimilación en el organismo, son los nutrientes más abundantes después del agua. Es fuente discreta de vitamina E o tocoferol y aporta una escasa cantidad de vitamina C. Es rica en pectina, fibra abundante en la manzana, que mejora el tránsito intestinal. Entre su contenido mineral sobresale el potasio y es baja en sodio. El potasio, mineral necesario para la transmisión y generación del impulso nervioso y para la actividad muscular normal, interviene en el equilibrio de agua dentro y fuera de la célula (Consumer, 2006).

En la **Tabla 2-1** se listan los principales nutrientes y su cantidad aproximada presentes en la manzana fresca.

2.3.3.2. Variedad Granny Smith

La variedad Granny Smith es de origen australiano. Es una de las más difundidas en el mundo, luego de Red Delicious y Golden Delicious. Nuestro país es uno de los productores más importantes junto con Chile, Brasil, Sudáfrica, entre otros. En general requiere de un clima cálido y luminoso para su cultivo. Los árboles son vigorosos de porte erecto, desordenados al desarrollar, con fructificaciones precoces y muy productivos, con tendencia a dar frutos en la extremidad de las ramas. Se polinizan con la variedad Golden Delicious y

suelen hacerse plantaciones con estas dos variedades exclusivamente debido a la autoesterilidad.

Tabla 2-1: Valor nutricional de la manzana en 100 g de sustancia comestible

MANZANA	
Nutrientes	**Cantidad aproximada**
Agua (g)	84
Proteínas (g)	0,3
Lípidos (g)	0,6
Carbohidratos (g)	15
Calorías (kcal)	58
Vitamina A (U.I.)	90
Vitamina B1 (mg)	0,04
Vitamina B2 (mg)	0,02
Vitamina B6 (mg)	0,03
Ácido nicotínico (mg)	0,1
Ácido pantoténico (mg)	0,1
Vitamina C (mg)	5
Ácido málico (mg)	270-1020
Ácido cítrico (mg)	0-30
Ácido oxálico (mg)	1,5
Sodio (mg)	1
Potasio (mg)	116
Calcio (mg)	7
Magnesio (mg)	5
Manganeso (mg)	0,07
Hierro (mg)	0,3
Cobre (mg)	0,08
Fósforo (mg)	10
Azufre (mg)	5
Cloro (mg)	4

Fuente: http://frutas.consumer.es

El fruto es de gran calibre, esférico y generalmente simétrico. Tiene color verde intenso que se vuelve más claro durante la maduración, con numerosas lenticelas de color blanquecino. La pulpa es de color blanco-verdoso, compacto y de sabor dulce-acidulado. En cuanto a su textura es muy firme, crujiente y jugosa. Es muy resistente al transporte y al almacenamiento, conservándose por largos períodos de tiempo en cámara frigorífica. Por estas características se ha seleccionado esta variedad como objeto de este estudio.

2.3.4. Pera

2.3.4.1. Origen, taxonomía e importancia

El origen de los perales se remonta a 2000 o 3000 años A.C. Es un árbol nativo de las regiones de Europa oriental y de Asia occidental. Deriva de la selección de las razas silvestres de peral *Pyrus communis* (var. Pyraster) hibridadas con otras especies europeas o asiáticas: *Pyrus nivalis* (var. Jacq), *Pyrus pyrifolia Nakai* (var. Burnf), *Pyrus spinosa* (ar. Forssk), etc. Los griegos y los romanos conocieron el cultivo del peral y fueron estos últimos quienes lo introdujeron en la Cuenca del Ebro. Con el descubrimiento de América fueron los españoles en América del Sur junto con los ingleses y franceses en América del Norte los que introdujeron este árbol en el continente americano. Los mayores productores de esta fruta son China, Italia, Estados Unidos, España y Argentina.

La pera pertenece a la familia *Rosaceae*, y dentro del género *Pyrus*, la especie más comun es *Pyrus communis*. Es un árbol piramidal de tronco alto y grueso, con hojas alternas y simples, generalmente ovaladas, flores blancas con largos cabillos que forman corimbos umbeliformes en la terminación de las ramillas y fruto en pomo, estrechado en la base; esta puede ser redondeada o atenuada y prolongada en el pedúnculo.

El cultivo prospera bien en climas terrados y algo húmedo, siendo más resistente al frío que al calor, necesita de suelos limosos y silíceo-arcillosos, sanos y permeables.

La pera es un fruto que posee más de un 80% de agua, y una cantidad muy baja de grasa, posee una gran cantidad de vitaminas y minerales (**Tabla 2-2**) como el potasio, magnesio y calcio y carece de sodio. Todo ello, junto a un elevado contenido en ácidos caféico, ursólico y ascórbico, así como arginina y arbutina, le confieren un gran poder

diurético. Su ingestión ayuda a incrementar la micción por lo que resulta muy adecuado en las dietas para perder peso. Esta fruta por tener grandes cantidades de fibra soluble en forma de pectinas, magnesio y zinc (que estimulan la producción de insulina y las epicatequinas con propiedades hipoglucémicas) constituyen un alimento adecuado para personas diabéticas (Barroca y col., 2006).

Se ha demostrado que las pectinas ayudan a rebajar el nivel de colesterol, al formar un gel en el intestino que atrapa este tipo de grasa y lo expulsa del organismo a través de las heces, además de tener la capacidad para absorber las toxinas del intestino e impedir que estas pasen a la sangre o ataquen la pared intestinal. El ácido cafeico y ácido pantoténico también poseen propiedades anticolesterolémicas. La vitamina C es la que más se destaca como principal antioxidante. El potasio junto con el calcio intervienen directamente, en el proceso de formación ósea, así como la regulación de líquidos en el cuerpo y el buen estado del sistema nervioso (Chen y col., 2007). Los taninos le confieren propiedades antibacterianas.

La pera también es rica en ácidos grasos poliinsaturados y en aminoácidos, algunos de ellos esenciales como la leucina, necesaria para el óptimo crecimiento en los infantes o la regeneración de los tejidos.

2.3.4.2. Variedades comerciales de pera (*Pyrus communis*)

Las variedades que se comercializan en Argentina provienen del peral común *Pyrus communis* surgidos por mejoramiento varietal, cuyas características son las siguientes:

William´s: es de color amarillo oro, con pocas lenticelas, un tamaño medio y sabor muy dulce. Tiene mucho jugo y un aroma muy agradable. Su pulpa de color blanco – amarillento, es firme y crujiente. Se utiliza como pera de mesa para comer directamente o para la fabricación de conservas y para la obtención de licores.

Packam´s Triumph: es muy jugosa y grande, de color verde-amarillo. Se emplea como pera de mesa. Su sabor es más bien ácido y de textura fina y crujiente.

Beurre D´anjou: es de color verde de mediano tamaño, con forma cónica y muchas lenticelas de color oscuro. Su pulpa firme y mantecosa es blanco – amarillento y presenta un sabor ligeramente ácido con un suave aroma.

Beurre Bosc: son peras grandes y alargadas, con la piel de color amarronada. Su pulpa es blanca, presenta una textura muy fuerte y un aroma muy destacado. Ideal para acompañar platos calientes.

Tabla 2-2. Valor nutricional de la pera en 100 g de sustancia comestible

PERA	
Nutrientes	**Cantidad aproximada**
Agua (g)	83
Energía (kcal)	59
Grasa (mg)	400
Proteína (mg)	390
Hidratos de carbono (g)	15,1
Fibra (g)	2,4
Potasio (mg)	125
Sodio (mg)	0
Fósforo (mg)	11
Calcio (mg)	11
Cobre (mg)	0,11
Magnesio (mg)	6
Manganeso (mg)	0, 08
Hierro (mg)	0,25
Zinc (mg)	0, 12
Selenio (mg)	1
Vitamina C (mg)	4
Vitamina B1 (Tiamina) (mg)	0, 02
VitaminaB2 (Riboflavin) (mg)	0, 04
Niacina (mg)	0, 10
Folacina (mg)	7
Vitamina B6 (mg)	0, 02
Vitamina A (mg)	20 IU
Vitamina E (mg)	0, 50

Fuente: http://frutas.consumer.es

2.4. Caracterización de los tejidos vegetales

2.4.1. Evaluación sensorial

La percepción de una sensación no es un proceso de un solo paso sino que al menos pueden discriminarse tres etapas. El estímulo se produce sobre el órgano sensorial y es transmitido al cerebro por el sistema nervioso. El cerebro, que además posee información sobre las experiencias previas, integra, organiza e interpreta las sensaciones, que llegan desde todos los sentidos, para generar una percepción. Finalmente el sujeto elabora una respuesta (Schiffman, 1996).

El ser humano tiende a percibir los atributos de un alimento en el siguiente orden:

- Apariencia
- Olor, aroma o fragancia
- Textura
- Sabor (compuestos aromáticos, gusto)

Sin embargo, en el proceso de percepción, la mayoría o la totalidad de los atributos se superponen, es decir, el sujeto recibe una mezcla de impresiones sensoriales casi simultáneamente, y sin entrenamiento el evaluador no es capaz de proporcionar una evaluación independiente de cada uno.

El primer panel de degustación documentado corresponde al creado por el gourmet francés Alexandre Grimod de Reyneire, que tuvo un rol preponderante en el desarrollo de la gastronomía moderna a los comienzos del siglo 19. El formó el *"Jury degustateur"*, formado por 5 a 12 probados epicúreos que evaluaban a ciegas vinos y platos en restaurantes.

En la década del 40 la destilería Seagram en Estados Unidos realizó una importante contribución al desarrollo de la evaluación sensorial. La gerencia no estaba conforme con la manera en que se intentaba mantener la calidad constante de sus productos. Estaban confiando en el errático criterio de un pequeño grupo de expertos, metodología que aún persiste en muchas industrias de alimentos. Scofield y Peryam realizaron el valioso aporte de desarrollar la prueba del triángulo y normalizar el ensayo del dúo-trío; ambos métodos fueron utilizados para asegurar que ningún producto se vendiera si mostraba diferencias con el estándar de la

empresa. Junto con estos ensayos de discriminación, se establecieron métodos de preferencia para guiar en la sustitución de ingredientes y el desarrollo de nuevos productos.

En la misma década otras contribuciones importantes fueron de Arthur D. Little Inc. que incorporó el método de Perfil de Sabor; y el ejército de los Estados Unidos, que estaba preocupado por la calidad de las raciones de sus soldados. Este ejército reunió psicólogos, tecnólogos de alimentos y estadísticos en un programa amplio orientado fundamentalmente a preferencia. La escala hedónica de 9 puntos, utilizada hoy en día, es fruto de este trabajo.

En la década del 50, en la Universidad de California de Davis, se reunieron dos decanos de la materia: Amerine y Pangborn. Ambos contribuyeron notablemente a la ciencia de la evaluación sensorial de alimentos. Uno de sus mayores aportes fue el pionero texto: *"Principles of Sensory Evaluation of Foods"*, editado en 1965.Otra institución que contribuyó mucho a esta ciencia fue la ASTM, que estableció a comienzos de la década del 60 el comité E-18 sobre "Evaluación Sensorial de Materiales y Productos". Ellos desarrollaron muchas normas de evaluación sensorial y en 1968 publicaron el *"Manual on Sensory Testing Methods",* donde con un riguroso ordenamiento publicaron todos los métodos vigentes hasta el momento. En los últimos años ha habido una verdadera explosión en la publicación de libros sobre evaluación sensorial.

En la actualidad la evaluación sensorial de alimentos es una ciencia establecida y aceptada por la industria de alimentos de avanzada. Hay numerosos libros sobre el tema, una publicación periódica especializada (*Journal of Sensory Studies*) y otras asociadas (e.g. *Food Quality and Preference*).

Los ensayos sensoriales que se utilizan para llevar a cado una evaluación de dividen en tres grupos según los objetivos que se busquen:

- Pruebas de discriminación: se buscan diferencias significativas entre productos.
- Ensayos descriptivos: se realiza una descripción completa de los productos a través de un panel entrenado.
- Ensayos afectivos: evaluar la respuesta (reacción, preferencia o aceptación) de consumidores reales o potenciales de un producto. A diferencia de los métodos analíticos que se realizan con evaluadores seleccionados y entrenados, las pruebas afectivas se realizan con los consumidores.

2.4.1.1. Características de la sala de evaluación sensorial

Es aconsejable utilizar un área de evaluación sensorial especial, en la que se minimice las distracciones y se puedan controlar todas las condiciones, de forma tal de garantizar que la situación sea constante para la próxima prueba. De ser posible, el ambiente debe ser tranquilo, agradable, de temperatura acondicionada y en algunos casos con control de humedad. No se permite fumar ni el uso de cosméticos o perfumes dentro del área.

La norma IRAM 20003/95 provee una guía para la instalación de los locales de ensayo en análisis sensorial y las dimensiones sugeridas para la construcción de las cabinas de evaluación.

2.4.1.2. Panel de evaluación sensorial

Existen distintos niveles de entrenamiento para los evaluadores que llevan a cabo las mediciones sensoriales y su utilidad depende del resultado que se busque o el tipo de prueba que se necesita realizar. Se puede realizar una clasificación según su nivel de entrenamiento (ASTM 1968):

- Panel de consumidores: no tienen ningún tipo de entrenamiento, se eligen entre la población teniendo en cuenta que sean consumidores del producto que van a evaluar. Son ideales para evaluar la aceptabilidad de un producto pudiendo también evaluar la intensidad de atributos en escalas simples siguiendo determinadas consignas en la elaboración del formulario.
- Panel semientrenado: constituido por personas familiarizadas con los atributos del producto que van a evaluar. Este panel es capaz de discriminar diferencias, medir intensidad de atributos en escalas y evaluar globalmente un producto. Tienen un lenguaje menos formal que el panel entrenado. La variabilidad individual puede balancearse considerando un mayor número de panelistas (25 a 40 miembros).
- Panel entrenado: son sujetos cuidadosamente seleccionados y entrenados en las propiedades sensoriales que han de evaluar en el alimento. Deben ser capaces de establecer la intensidad de una modalidad sensorial, tanto como la apreciación global de un alimento. El entrenamiento asegura la utilización sistemática de la combinación de las percepciones

sensoriales de los evaluadores como guía analítica para determinar la calidad de los productos alimenticios. Poseen un lenguaje formal y en muchas ocasiones tienen conocimiento científico de las propiedades que miden. Dado el elevado conocimiento que poseen del producto y su entrenamiento, se utiliza un número reducido de integrantes (no más de 10).

2.4.1.3. Evaluación sensorial de la textura

La textura es una manifestación sensorial y funcional de las propiedades superficiales, mecánicas y estructurales detectadas a través de los sentidos (vista, oído, tacto y kinestésicos). Solo los humanos pueden percibir y describir las sensaciones multiparamétricas de la textura (Szczesniak, 2002).

Es muy importante notar que la textura no puede ser percibida si el alimento no ha sido deformado. Si tomamos una manzana en la mano, mientras no hayamos deformado la fruta, la textura no se manifestará. El tacto podrá indicarnos su peso y temperatura, y la vista nos permitirá apreciar su color y brillo, pero no su textura. En cambio, si la oprimimos ligeramente con el dedo pulgar o con toda la mano, la manzana sufrirá una pequeña deformación debida al esfuerzo ejercido sobre ella, y entonces la textura empezará a hacerse evidente. El tacto nos dará información de si la fruta es dura o blanda, si se siente que cede bajo la piel o, por el contrario, tiene bastante resistencia. Al mismo tiempo, la vista percibirá la deformación y podrá darnos una noción de sus atributos de textura. Si la fruta es deformada aún más, cortándola con un cuchillo o mordiéndola, más atributos de textura empezarán a manifestarse tales como la crujencia (en cuya detección participa el sentido del oído además del tacto), la cohesividad de la fruta, su adhesividad (si la tuviera) y se confirmarán las características de dureza y resistencia. Deformándola todavía más, como ocurre al masticarse la fruta, podrán percibirse otras características; por ejemplo, el oído nos indicará si la manzana es crujiente y jugosa o no, el contacto con la parte interna de las mejillas (así como en la lengua, las encías y el paladar) nos permitirá percibir sensaciones de fibrosidad, granulosidad, harinosidad, tersura, aspereza, etc.; y al deglutir el alimento, la garganta confirmará la tersura o aspereza y otras características.

No sólo los alimentos sólidos tienen textura, sino también los semisólidos y líquidos. Por lo general, cuando se trata de alimentos semisólidos, en vez de textura se habla de consistencia, y en los líquidos se hace referencia a la viscosidad.

La evaluación de textura en alimentos es un problema complejo, donde la combinación de técnicas incluyendo análisis sensorial, instrumental y de microestructura podría ser la mejor forma de resolverlo (Anton y Luciano, 2007). Si bien el análisis sensorial puede dar una completa descripción de la textura es de interés el desarrollo de técnicas instrumentales para su estudio (Roudaut y col., 2002).

El entrenamiento para obtener un panel para evaluar textura en alimentos tiene como objetivo medir cuantitativamente los atributos de textura. El método descriptivo de Perfil de Textura fue desarrollado por Brandt y col. (1963). En el desarrollo del método se buscó eliminar problemas de variabilidad entre sujetos, permitir una comparación de los resultados con materiales conocidos, y proveer una correlación con métodos instrumentales.

El método de Perfil de Textura es el análisis sensorial de la textura de un alimento en términos de sus características mecánicas, geométricas, contenido de grasa y humedad; en el orden en el cual estas aparecen desde la primera mordida y durante el progreso de la masticación (**Figura 2-4**). En el mismo se utiliza una terminología estandarizada, muestras de referencia y procedimientos de evaluación controlados a fin de eliminar los juicios subjetivos que puedan surgir durante la evaluación realizada por el panel.

Las características texturales involucradas en el método de Perfil de Textura se detallan a continuación:

Mecánicas: relacionadas con la reacción del alimento a un esfuerzo aplicado. Estas son medidas por los sentidos quinestésicos que corresponden a la sensación de posición, movimiento y tensión de las partes del cuerpo a través de las terminales nerviosas de los músculos, tendones y articulaciones.

Geométricas: relacionadas con el ordenamiento de los componentes físicos de un alimento tales como tamaño, forma, presencia de fibras, partes blandas y partículas duras. Estas se perciben por el sentido del tacto en la lengua, cavidad bucal y garganta.

Otras características: relacionadas con el contenido de humedad y grasa del alimento y su liberación. Estas son percibidas por las terminales nerviosas táctiles en la cavidad bucal.

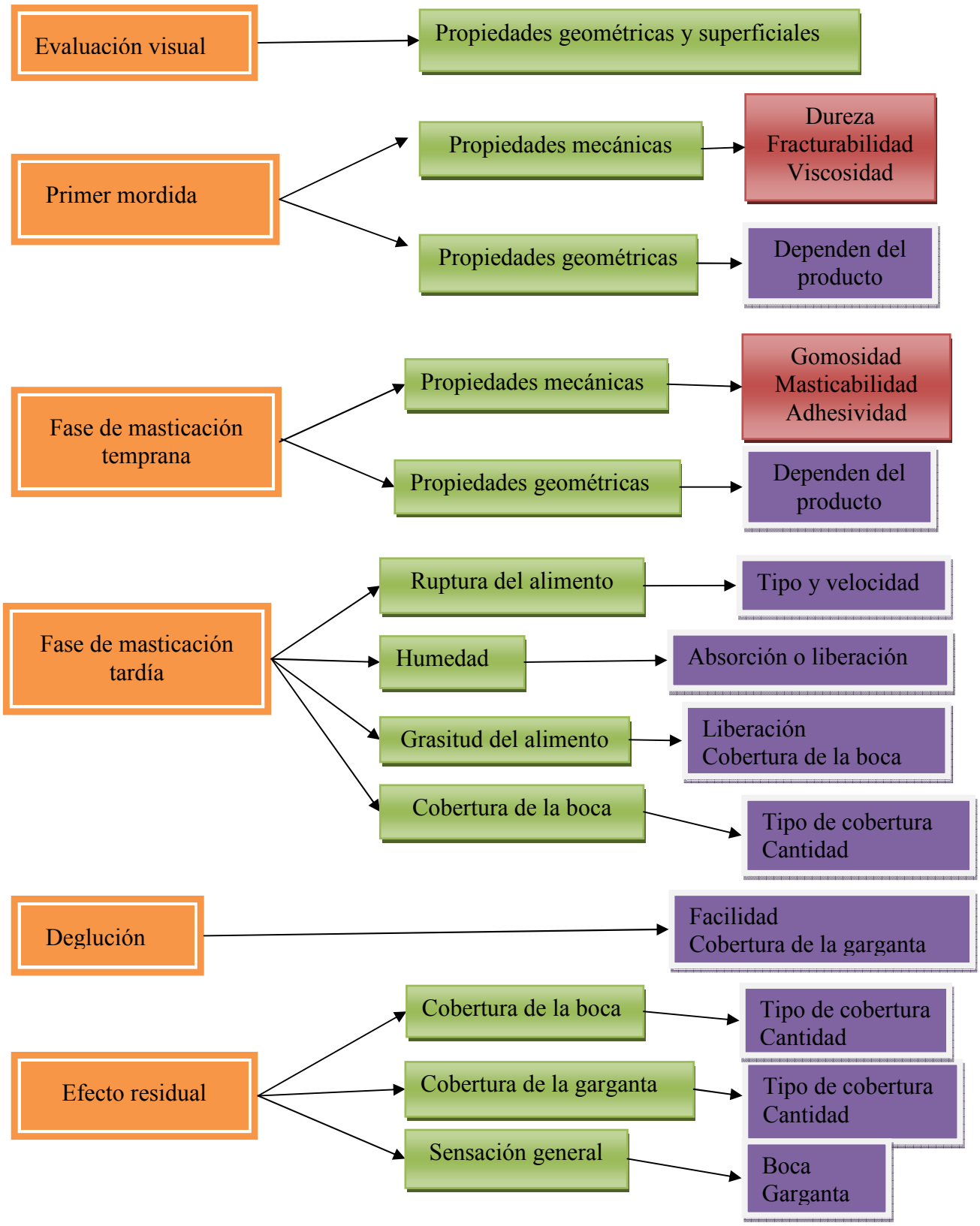


Figura 2-4. Sensaciones asociadas al Perfil de Textura de un alimento. Adaptado de Szczesniak (2002).

Dado que la textura es un atributo resultante de la interacción de varios parámetros existen varios términos asociados a su interacción. Szczesniak (1963) desarrolló una clasificación de los términos asociados a la textura que se detallan en la **Tabla 2-3.**

Tabla 2-3. Clasificación de las características texturales **(**Szczesniak, 1963).

CARACTERISTICAS MECANICAS		
Parámetros		
Primarios	Secundarios	Términos relacionados
Dureza		Blando, firme, duro
Cohesividad	Fracturabilidad	Quebradizo, crocante
	Masticabilidad	Tierno
	Gomosidad	Pastoso, gomoso, harinoso
Viscosidad		Espeso, fluido
Elasticidad		Plástico, movedizo
Adhesividad		Pegajoso
CARACTERISTICAS GEOMETRICAS		
Tipo de características		Ejemplos
Tamaño de partícula y forma característica		Granuloso, arenoso, grueso
Forma de partícula y orientación		Fibroso, celular, cristal
OTRAS CARACTERISTICAS		
Parámetros		
Primarios	Secundarios	Términos relacionados
Humedad		Seco, mojado, acuoso
Contenido de grasa		Aceitoso, grasoso

Si bien la textura es una propiedad sensorial, la clasificación de las características texturales para alimentos sólidos y semisólidos surgió de la descripción del método del Perfil de Textura (TPA) aplicable tanto a las evaluaciones sensoriales (Brandt y col., 1963) como instrumentales (Bourne, 1978; Szczesniak y col., 1963). Estos parámetros mecánicos pueden definirse desde ambos puntos de vista (**Tabla 2-4**).

Tabla 2-4. Definiciones de los parámetros mecánicos (Civille y Szczesniak, 1973).

Parámetro	Definición física	Definición sensorial
Propiedades primarias		
Dureza	Fuerza necesaria para obtener una dada deformación.	Fuerza requerida para comprimir una sustancia entre los molares (sólidos) o entre la lengua y el paladar (semisólidos).
Cohesividad	Grado en el cual un material puede ser deformado antes de su ruptura.	Grado en el cual una sustancia es comprimida entre los dientes antes de su ruptura.
Viscosidad	Velocidad de flujo por unidad de fuerza.	Fuerza requerida para verter un líquido sobre la lengua desde una cuchara.
Elasticidad	Velocidad a la cual un material recupera su forma original luego de que la fuerza de deformación es removida.	Velocidad a la cual un producto vuelve a su forma original luego de haber sido comprimido entre los dientes.
Adhesividad	Trabajo necesario para vencer las fuerzas atractivas entre la superficie del alimento y la de otro material con el que haya entrado en contacto.	Fuerza requerida para remover el material adherido a la boca, generalmente el paladar, durante el proceso normal de ingestión.
Propiedades secundarias		
Fracturabilidad	Fuerza con la cual un material se fractura; un producto de alto grado de dureza y bajo grado de cohesividad.	Fuerza con la cual una muestra se desmenuza, rompe o fractura.
Masticabilidad	Energía requerida para masticar un alimento sólido hasta un estado listo para ser tragado; una combinación de dureza, cohesividad y elasticidad.	Tiempo en segundos requeridos para masticar la muestra, a una tasa constante de aplicación de fuerza hasta reducirlo a una consistencia adecuada para tragarlo.
Gomosidad	Energía requerida para desintegrar un alimento semisólido a un estado listo para ser tragado; una combinación de bajo grado de dureza con alto grado de cohesividad.	Densidad percibida a través de la masticación; energía requerida para desintegrar un alimento semisólido a un estado listo para ser tragado.

2.4.1.4. Selección de los evaluadores para formar un panel de textura

El uso de personas para medir propiedades sensoriales es análogo al uso de cualquier instrumento utilizado para medir los parámetros de un producto. El instrumento se selecciona por su capacidad de proveer la medida deseada lo más exacta y consistentemente posible. Análogamente, se utilizan determinados criterios en la selección de miembros de un panel.

Los candidatos pueden ser reclutados a través de seminarios, cuestionarios, o contacto personal. Los candidatos deben ser informados sobre los objetivos de la selección, el tiempo que les va a insumir durante y después de la selección, y los procedimientos generales que se van a utilizar.

No hay reglas fijas en cuanto a las pruebas y criterios de selección. Fundamentalmente dependerá del tipo de trabajo que se espera del evaluador. Los procedimientos generales para selección de evaluadores para formar un panel se encuentran descriptos en las normas IRAM 20005-1 (1996) e IRAM 20005-2 (1996) que profundizan en la forma de construcción de paneles de evaluadores expertos.

En las pruebas de selección se recopila información sobre los hábitos alimentarios, ocupación, salud, actitud y características personales que permiten el trabajo en equipo. Los candidatos no deben presentar problemas de salud que puedan interferir con la percepción del estimulo que se busca evaluar, particularmente en el caso de un panel de textura oral se deben descartar los candidatos que presenten prótesis dentales o problemas en la mandíbula (Meilgaard y col, 2006).

2.4.1.5. Entrenamiento

El entrenamiento de los evaluadores está diseñado para familiarizar al individuo con los procedimientos de las pruebas o métodos sensoriales; aumentar su habilidad en detectar, identificar y describir los atributos sensoriales (color y apariencia, aroma, textura manual y bucal, “flavor” (gusto y aroma) y gusto residual) en sistemas complejos como son los alimentos, u otros estímulos sensoriales provenientes de cualquier producto; desarrollar la sensibilidad y memoria para que pueda brindar mediciones sensoriales precisas, consistentes y

reproducibles. Las Normas IRAM 20005-1/2 proveen las bases para el desarrollo de las etapas de entrenamiento de los evaluadores sensoriales.

Los resultados se discuten en grupo y los evaluadores pueden volver a evaluar las muestras a fin de chequear y corregir posibles desacuerdos.

2.4.1.5.1. Uso de las escalas para evaluar textura

Para proveer un método cuantitativo de evaluación de las propiedades mecánicas de textura fueron desarrolladas por diferentes autores escalas de clasificación estándar. Estas escalas son ilustrativas del concepto básico de usar productos de referencia familiares para cuantificar cada atributo de textura. Las mismas reflejan el rango de intensidades de la propiedad que puede encontrarse normalmente en el alimento. Se las puede utilizar sin modificación o adoptar otros productos de referencia según la disponibilidad local, hábitos alimentarios, etc. (norma IRAM 200013, 2001).

Los primeros pasos del entrenamiento incluyen la presentación de las definiciones de los atributos de textura y la forma de evaluación de cada atributo. Posteriormente se presentan las escalas para que se familiaricen con el atributo a percibir y con sus alimentos de referencia. En general se utilizan escalas semiestructuradas donde un centímetro corresponde a una unidad de medición con anclas finales y extensiones de 1,5 cm de los extremos. El sentido de las escalas es de intensidad creciente del descriptor de izquierda a derecha. Se puede acompañar de marcas que representan a los alimentos de referencia para facilitar así la tarea de los evaluadores.

Durante el entrenamiento, los jueces son expuestos a los alimentos que representan distintos puntos de la escala de una dada modalidad o atributo sensorial (dureza; jugosidad; cohesividad; etc.). Reconocen qué punto representa de la escala cada uno de ellos e incorporan dicho conocimiento. Una vez concluido el entrenamiento, que podrá ser más o menos largo dependiendo de la metodología seleccionada, los jueces serán capaces de medir la intensidad del atributo en una muestra con ayuda o no de alimentos de referencia de la escala. Si bien existen numerosas escalas descriptas en la literatura (Meilgaard y col. 2006; Chauvin y col. 2008) la metodología del Perfil de Textura requiere de la adaptación de los alimentos de referencia a una escala de aplicación local. El entrenamiento también puede incluir el

desarrollo de escalas por parte del panel. Esta adaptación requiere de numerosas pruebas y de la interacción entre el panel y el coordinador para encontrar las dificultades en la escala planteada (Hough y col., 1994; Meilgaard y col., 2006; Lawless y Heymann, 2010). Además los alimentos de referencia deben ser de calidad reconocida y presentar las menores variaciones de textura posibles con el cambio de lote de producción.

2.4.1.5.2. Seguimiento y control de los evaluadores

Es necesario controlar periódicamente la efectividad del panel. Para esto pueden utilizarse muestras de control o duplicados a fin de detectar discrepancias entre los panelistas o si alguno de ellos no logra resultados reproducibles. En los casos en que se presenten dudas o desacuerdos entre los panelistas pueden llevarse a cabo discusiones abiertas coordinadas por el líder de panel con el objetivo de clarificar conceptos y unificar criterios.

2.4.2. Propiedades reológicas

La reología es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de la materia cuando se someten a la acción de una fuerza externa.

Los alimentos son materiales complejos cuyas características y propiedades deseadas, especialmente las mecánicas, dependen frecuentemente de su estructura, esto es, del arreglo espacial de los elementos estructurales a niveles micro y submicro, y está determinada por la composición química y las fuerzas físicas. Existe una relación directa entre la estructura y la textura (Stanley y Tung, 1975).

El análisis y la cuantificación del comportamiento reológico de las frutas y vegetales y la investigación de las causas químicas y estructurales que lo determinan es un asunto de gran interés en la ciencia de los alimentos. Su importancia radica fundamentalmente en tres razones: la primera es que existe en la naturaleza un gran número y variedad de estos productos que son económicamente importantes y que además son imprescindibles en la dieta humana contemporánea. La segunda razón consiste en que las propiedades mecánicas del tejido de las frutas y vegetales son dependientes del tiempo, haciendo esencial cualquier estudio reológico. La tercera razón es que las propiedades mecánicas son relevantes para

muchos aspectos del estudio de estos materiales, incluyendo las causas y magnitud del daño durante la cosecha, el transporte, y el almacenamiento; la percepción humana sobre la calidad del producto; y los cambios fisiológicos que toman lugar en el producto durante el crecimiento, la maduración, y el almacenamiento luego de la cosecha. En conclusión, las propiedades reológicas de frutas y vegetales son importantes para el estudio de la fisiología de las plantas, la horticultura, la ingeniería y la ciencia de los alimentos (Pitt, 1992).

La reología ha sido extensamente aplicada en frutas y vegetales en un esfuerzo por entender la relación entre la estructura, la textura, y los cambios inducidos por los distintos procesos (Edwards, 1999).

2.4.2.1. Comportamiento reológico de materiales alimenticios

La denominación de sólidos elásticos se aplica a aquellos materiales que tienen una forma definida y se deforman bajo la aplicación de fuerzas externas entrando en una nueva forma de equilibrio. Cuando estas fuerzas externas se remueven, se revierte la forma exactamente al estado original. El sólido almacena toda la energía que obtiene a través del trabajo hecho por las fuerzas externas durante la deformación. Esta energía luego está disponible para restablecer el cuerpo a la forma original cuando se remueven las fuerzas aplicadas.

Se denominan líquidos viscosos a aquellos materiales que no tienen forma definida (adoptan la del recipiente que los contienen) y fluyen irreversiblemente bajo la acción de fuerzas externas. La energía de deformación de los fluidos se disipa en forma de calor.

Los materiales alimenticios tienen propiedades que son intermedias entre un sólido elástico y un líquido viscoso; esta combinación de la conducta es generalmente llamada conducta viscoelástica (Ward, 1990) (**Figura 2-5**).

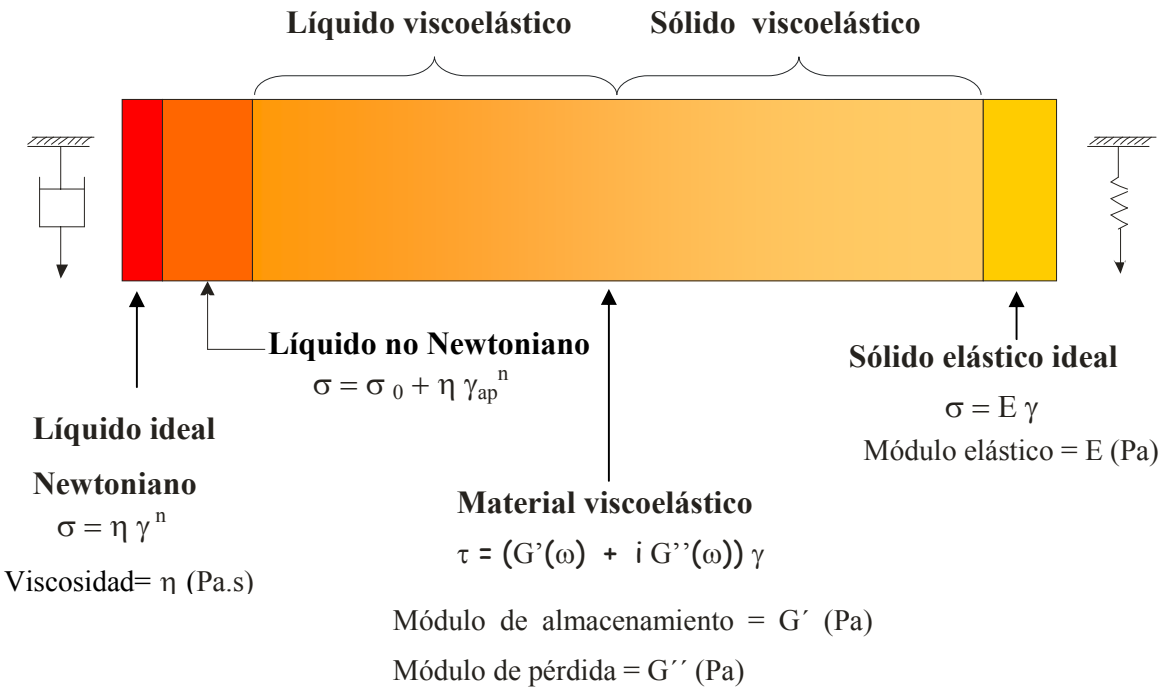


Figura 2-5. Espectro del comportamiento mecánico en estructuras alimenticias. Fuente: Aguilera y Stanley (1990).

Cuando la relación entre la tensión aplicada y la deformación resultante es sólo función del tiempo, se considera que el material es viscoelástico lineal. En muchos materiales reales se verifica este comportamiento si las deformaciones son pequeñas. Sin embargo el comportamiento general de los materiales suele variar con el tiempo y con la magnitud aplicada. En estos casos se dice que el material presenta un comportamiento viscoelástico no lineal. No existe una teoría general que defina este tipo de comportamiento, y para caracterizar la respuesta reológica de los alimentos sólidos se estudian éstos en condiciones experimentales que permitan la aplicación de las bases teóricas que definen el fenómeno de viscoelasticidad lineal.

2.4.2.2. Conceptos básicos de reología

Fuerza: Cuando una fuerza actúa externamente sobre un cuerpo se pueden distinguir diferentes casos: tensión, compresión y cizalla. La torsión envuelve tensión y compresión, el torque incluye cizalla, y la compresión hidroestática involucra a los tres tipos de fuerza. Todos

los demás casos involucran a estos tres casos individuales o combinación de estos (deMan, 1975).

Esfuerzo ó tensión: Respuesta o reacción interna de un material a la fuerza aplicada:

$$\text{Esfuerzo} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área}} = \frac{F}{A} = \frac{[N]}{[m^2]} = [Pa] \qquad \textbf{(2-4)}$$

Esfuerzo normal (σ): Perpendicular al área.

Esfuerzo de cizalla (τ): Paralelo al área.

Deformación: Cambio relativo en las dimensiones o forma de un cuerpo expuesto a un esfuerzo. Es una cantidad adimensional.

Deformación normal (ε): Cambia una dimensión. El cambio por unidad de longitud es debido a una fuerza (tensión o compresión) en una dimensión lineal original.

Deformación de cizalla (γ): Deslizamiento. La tangente del ángulo cambia, debido a una fuerza (cizalla), entre dos líneas originalmente perpendiculares una a otra a través de un punto en un cuerpo (Mohsenin, 1978).

Módulo de elasticidad (E): También llamado Módulo de Young. Se define como la relación entre el esfuerzo normal aplicado (σ) y la deformación normal (ε) que se obtiene.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{[Pa]}{[1]} = [Pa] \qquad \textbf{(2-5)}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{[m]}{[m]} \qquad \textbf{(2-6)}$$

Donde: σ es el esfuerzo, ε es la deformación normal, ΔL es el cambio en la longitud L es la longitud original del espécimen.

Módulo de cizalla (G): También llamado Módulo de Rigidez. Se obtiene como la relación entre el esfuerzo de cizalla aplicado (τ) y la deformación de cizalla (γ) que se obtiene.

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{[Pa]}{1} = [Pa] \qquad \textbf{(2-7)}$$

$$\gamma = \frac{\Delta L}{h} = \frac{[m]}{[m]} = \tan g(\theta) \qquad \textbf{(2-8)}$$

Donde: τ es el esfuerzo de cizalla, γ es la deformación de cizalla, ΔL es el cambio en la longitud h es el espesor del espécimen.

Velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$)

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial \gamma}{\partial t} = \frac{1}{[s]} = [s^{-1}] \qquad \textbf{(2-9)}$$

Donde: γ es la deformación de cizalla y t es el tiempo.

Viscosidad (η): Fricción interna del fluido que provoca la resistencia a fluir.

2.4.2.3. Evaluación instrumental de las propiedades reológicas

Los métodos o ensayos reológicos fundamentalmente estudian la evolución de tres variables (tensión, deformación y tiempo) en condiciones experimentales en las cuales se cumpla la linealidad de la respuesta viscoelástica (Sherman, 1970; Costell y col., 1997).

En función del tipo y dirección de la fuerza que se aplica sobre el producto, existen distintos tipos de ensayos reológicos:

- Ensayos de tensión – deformación
- Ensayos de tensión – tiempo
- Ensayos de deformación – tiempo (ensayos de fluencia)

2.4.2.3.1. Ensayos reológicos a bajas deformaciones

En este tipo de ensayos las deformaciones que se aplican sobre la superficie del material son pequeñas. Se pueden realizar dos tipos de ensayos: rotatorios y oscilatorios. Un ensayo rotatorio como el de fluencia permite predecir separadamente las características elásticas, viscoelásticas y de flujo viscoso (Jackman y Stanley, 1992a). Por otra parte, los ensayos oscilatorios otorgan datos de viscosidad y elasticidad relacionados con el tiempo de respuesta (Schramm, 1994).

Los ensayos oscilatorios, los ensayos de relajación y los ensayos de fluencia – recuperación son usualmente utilizados para determinar las propiedades del material en la región viscoelástica lineal, permitiendo caracterizar la microestructura sin disrupción de la misma durante el proceso (Khan y col., 1997). En materiales frutihortícolas se utiliza la teoría de viscoelasticidad lineal con esfuerzos y deformaciones pequeñas, con lo cual se obtienen simples modelos matemáticos (combinación de elementos elásticos y viscosos), que son necesarios para estimar un gran número de parámetros, los cuales podrán ser relacionados con la estructura del material (Ferry, 1980; Jackman y Stanley, 1992a).

- **Ensayo de fluencia y recuperación (rotatorio)**

El ensayo de fluencia – recuperación se divide en dos etapas; en la primera etapa se aplica un esfuerzo de cizalla constante hasta un tiempo t_1, luego del cual se remueve el esfuerzo. Durante el ensayo se registra la deformación que sufre la muestra en función del tiempo (**Figura 2-6**).

Cuando las curvas de fluencia (capacitancia vs. tiempo) para diferentes valores de esfuerzo de cizalla coinciden, puede afirmarse que la conducta es viscoelástica lineal. En muchos casos, solamente con deformaciones muy pequeñas la respuesta es viscoelástica lineal y por lo tanto puede aplicarse sólo en un rango muy estrecho de esfuerzos de cizalla.

Un material viscoelástico sometido a un esfuerzo de cizalla instantáneo y constante, por un tiempo suficiente de manera tal de prevenir que el material muestre una elasticidad pura, pero sin superar el rango viscoelástico lineal, exhibe una conducta de un sólido elástico en las primeras etapas del cizallamiento seguido de una conducta de un fluido viscoso “en el

sentido tal que el trabajo de la deformación de cizalla no es conservada totalmente, como en un sólido, ni es disipada completamente como en un fluido" (Sherman, 1970).

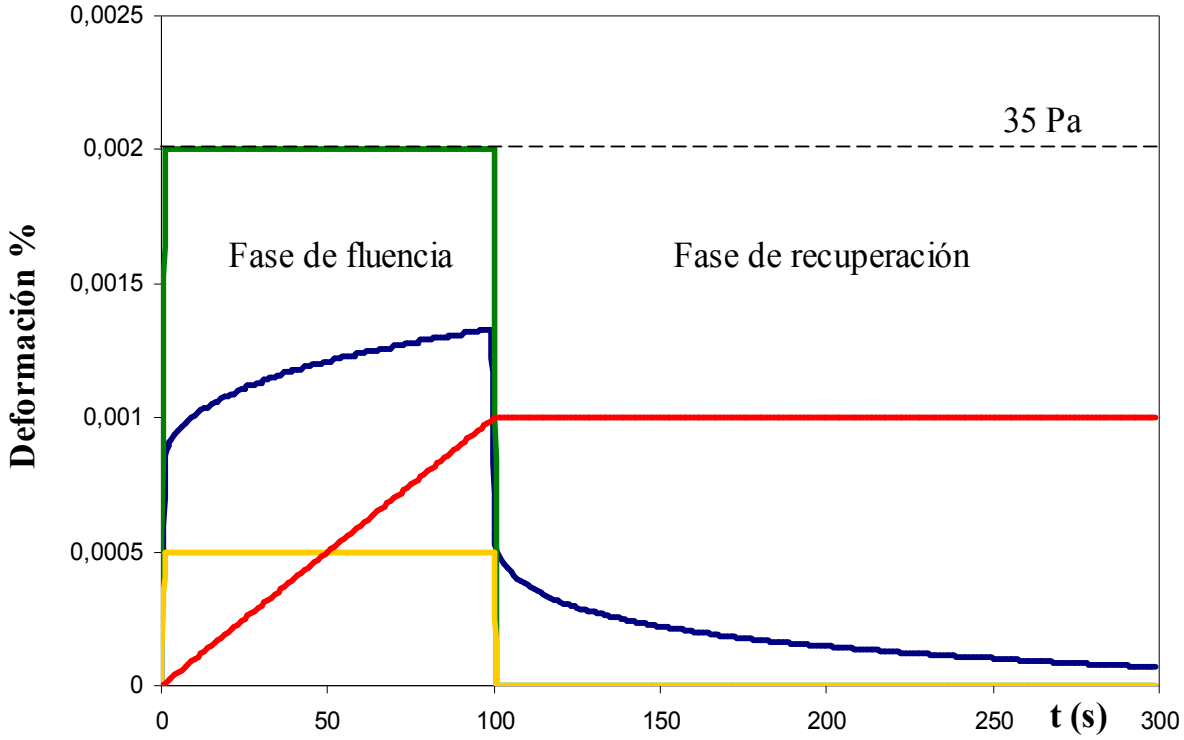


Figura 2-6: Respuesta del esfuerzo y la deformación de distintas muestras típicas. (▬) Respuesta viscoelástica; (▬) Esfuerzo aplicado; (▬) Respuesta sólido ideal; (▬) Respuesta líquido Newtoniano.

En la mayoría de los casos, la deformación total γ de un material viscoelástico es la suma de tres partes separadas γ_0, γ_R y γ_N (**Figura 2-7**). γ_0 y γ_R corresponden a la deformación elástica instantánea y a la deformación elástica de retardo, respectivamente; mientras que γ_N es la deformación debido al flujo Newtoniano. Debido a que el material muestra una conducta lineal, la magnitud de las deformaciones γ_0, γ_R y γ_N son exactamente proporcionales a la magnitud del esfuerzo aplicado. Se define a la capacitancia como (Ward, 1990):

$$\frac{\gamma(t)}{\tau} = J(t) = J_0 + J_R + J_N \qquad \textbf{(2-10)}$$

Donde: J_0, J_R y J_N corresponden a γ_0, γ_R y γ_N respectivamente

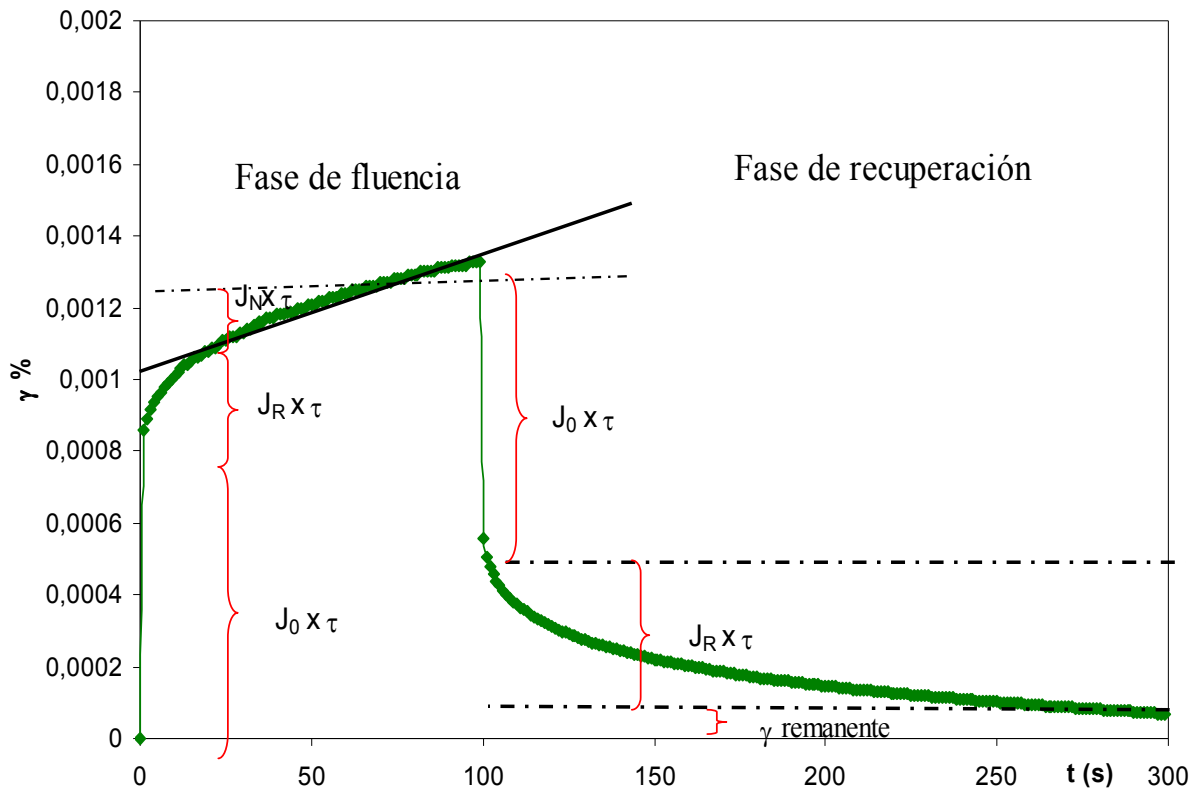


Figura 2-7. Curva de capacitancia – tiempo para una muestra viscoelástica.

Cuando un material exhibe una conducta viscoelástica lineal en el ensayo de fluencia, se puede representar su conducta mediante un **modelo mecánico** (Sherman, 1970). El principio básico de la reología de los sólidos elásticos es la ley de Hooke, que define el sólido ideal como aquél que se deforma instantánea y proporcionalmente a la magnitud de la fuerza aplicada y se recupera también instantáneamente al retirar la fuerza

$$\tau = E\ \gamma \qquad \textbf{(2-11)}$$

Donde: τ es la fuerza por unidad de superficie, E el módulo de elasticidad y γ la deformación.

No se conoce ningún alimento sólido que se comporte como ideal. Todos muestran un comportamiento viscoelástico en su respuesta mecánica, es decir que además de un comportamiento hookeano, manifiestan la presencia de un componente viscoso. Debido a este

último elemento, la deformación del sólido viscoelástico no es instantánea, se produce en un tiempo finito y medible.

Entre los alimentos y, en general entre los materiales biológicos, no hay ninguno que responda totalmente a los principios teóricos de la viscoelasticidad lineal; en general son anisotrópicos (las propiedades mecánicas son diferentes según la dirección considerada), no uniformes y en muchos casos químicamente activos y físicamente inestables, lo que equivale a propiedades fuertemente dependientes del tiempo y de las condiciones de aplicación de la fuerza (Costell y col., 1997).

En el diseño de los modelos mecánicos para representar alimentos intervienen dos elementos simples que combinados de distinta forma representan diferentes comportamientos. Estos dos elementos son: el elemento elástico ideal que se representa mediante un resorte y cuyo comportamiento queda definido por E y el elemento viscoso ideal que se representa mediante un pistón que se desplaza dentro de un líquido newtoniano y cuyo comportamiento queda definido por su viscosidad η. Los dos modelos viscoelásticos básicos son el modelo de Maxwell y el modelo de Kelvin Voigt.

Modelo de Maxwell: este modelo se compone de un resorte y un pistón dispuestos en serie (**Figura 2-8**). En el modelo de Maxwell la deformación total (γ) del sistema, para un tiempo t, esta compuesta por dos partes; una puramente viscosa, y la otra puramente elástica: $\gamma(t) = \gamma_\eta + \gamma_E$, y la tensión (τ) que ambas partes soportan es de igual magnitud $\tau = \tau_\eta = \tau_E$. En este modelo primero reacciona el sólido elástico representado por el resorte (Costell y col., 1997).

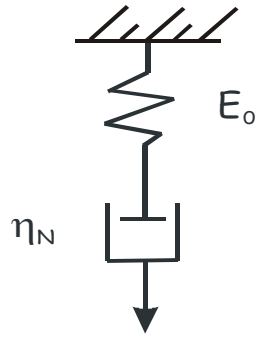


Figura 2-8. Representación del Modelo de Maxwell.

Modelo de Kelvin - Voigt: este modelo se compone de un resorte y un pistón dispuestos en paralelo (**Figura 2-9**). En el modelo de Kelvin – Voigt el esfuerzo (τ) es la suma de los dos componentes: $\tau = \tau_\eta + \tau_E$, uno es proporcional a la velocidad de deformación y el otro a la deformación. La deformación (γ) que soporta es de igual magnitud $\gamma = \gamma_\eta = \gamma_E$. Como los elementos están dispuestos en paralelo, éstos se desplazan juntos al mismo tiempo (Costell y col., 1997).

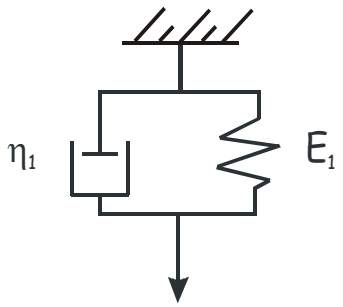


Figura 2-9. Representación del Modelo de Kelvin.

Los materiales reales son muy complejos y necesitan una mayor combinación de resortes y pistones que las dadas por los modelos simplificados de Maxwell y de Kelvin para describir el comportamiento viscoelástico en los ensayos de fluencia y recuperación. Estos materiales reales no pueden ser definidos por un simple tiempo de retardo, como ya se ha mencionado; por esa razón el modelo más utilizado para representar los materiales viscoelásticos en los ensayos de fluencia es el modelo de Kelvin – Voigt generalizado (Schramm, 1994).

Modelo de Kelvin – Voigt Generalizado: Este modelo consiste en n elementos de Kelvin en serie con un resorte inicial y un elemento viscoso al final (**Figura 2-10**). Los datos experimentales de varios materiales viscoelásticos, incluyendo los materiales biológicos, han mostrado más de un tiempo de relajación o tiempo de retardo. Para estos materiales, la conducta completa no puede ser representada por un simple modelo de Maxwell o de Kelvin o ni siquiera por un modelo de Burger de 4 elementos. Cada uno de estos modelos tiene una sola constante de tiempo. Para representar el comportamiento viscoelástico de manera más realista,

se utiliza el modelo de Kelvin – Voigt con un tiempo de retardo por cada modelo de Kelvin que haya en la cadena.

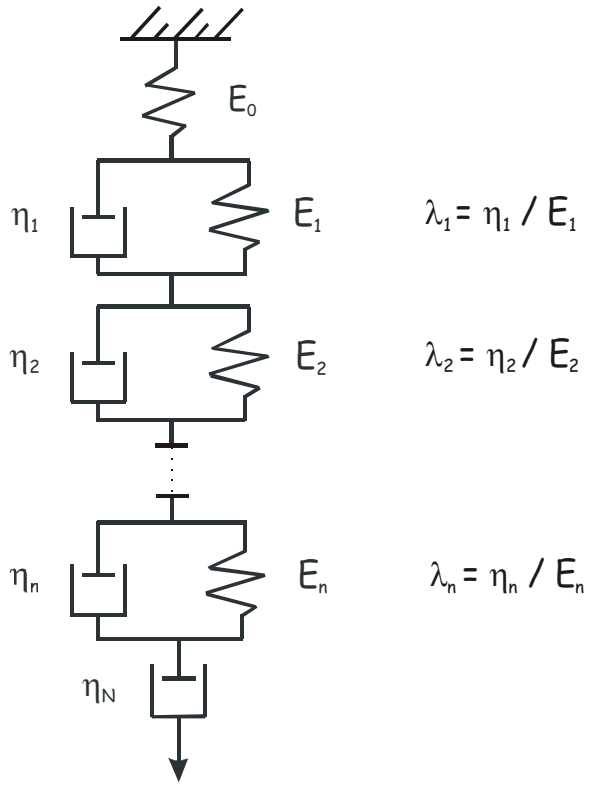


Figura 2-10. Representación del Modelo de Kelvin – Voigt Generalizado.

Por razones de simplicidad se procederá a detallar el comportamiento de un material que sigue el modelo de Burger de 4 elementos para describir las curvas de fluencia y recuperación.

Modelo de Burger: Es la combinación de un modelo de Maxwell y uno de Kelvin en serie (**Figura 2-11**) (deMan, 1975). Este modelo con cuatro elementos es uno de los modelos reológicos que han sido utilizados para predecir con mayor exactitud el comportamiento de fluencia en muchos materiales.

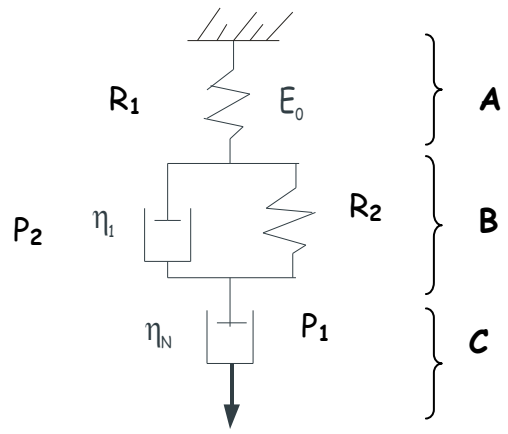


Figura 2-11. Representación del Modelo de Burger.

Observando la **Figura 2-11,** notamos que en el modelo de los cuatro elementos las deformaciones son aditivas mientras que el esfuerzo es el mismo para las tres unidades A, B y C.

$$\gamma = \gamma_A + \gamma_B + \gamma_C \qquad \textbf{(2-12)}$$

$$\tau = \tau_A = \tau_B = \tau_C \qquad \textbf{(2-13)}$$

Sustituyendo τ_A, τ_B y τ_C por:

$\tau_A = E_0\, \gamma_A$ (correspondiente a la deformación instantánea)

$\tau_B = E_0\, \gamma_B + \eta\, \dot{\gamma}_B$ (correspondiente a la deformación elástica retardada)

$\tau_C = \eta\, \dot{\gamma}_C$ (correspondiente al fluido Newtoniano)

Estas tres ecuaciones pueden combinarse en una ecuación diferencial que es lo suficientemente general como para describir el comportamiento ante un esfuerzo constante (fluencia) y ante una deformación constante (relajación del esfuerzo). Sin embargo, resulta mucho más sencillo utilizar el modelo de Maxwell generalizado para la relajación del esfuerzo.

Por lo tanto, si se aplica instantáneamente un esfuerzo constante, $\tau = \tau_0$, se obtiene la siguiente ecuación (Mohsenin, 1978).

$$\gamma\,(t) = \tau_0 / E + \tau_0 / E_1\,(1 - e^{-t/\lambda}) + ((\tau_0\, t\,) / \eta_N) \qquad \textbf{(2-14)}$$

Definiendo a la función capacitancia J(t) como la inversa del módulo E(t) o como la relación entre la deformación y el esfuerzo, la ecuación 2-14 se expresa como:

$$J\,(t) = J_0 + J_1\,(1 - e^{-t/\lambda}) + (t\ / \eta_N) \qquad \textbf{(2-15)}$$

Donde: $J_0 = 1 / E_0$ = capacitancia inicial, y $J_1 = 1 / E_1$ = capacitancia de retardo

Una curva típica de fluencia (capacitancia vs. tiempo) (etapa de fluencia), como ya se ha mencionado, puede dividirse en tres regiones principales (Schramm, 1994):

1) La muestra reacciona ante el esfuerzo aplicado con una deformación espontánea γ_0, representada por el resorte R_1. En esta región, las uniones entre la estructura primaria son extendidas elásticamente.

2) Todos los elementos trabajan para la respuesta de la curva: el resorte R_2 y el pistón P_2. La constante de tiempo de este movimiento se llama tiempo medio de retardo. Esta región es elástica de retardo dependiente del tiempo con una capacitancia (J_R). Acá las uniones se rompen y reforman. Todas las uniones no se rompen y reforman a la misma velocidad. Las uniones más débiles se rompen a menores valores de tiempo que las uniones más fuertes. Esta región está representado por:

$$J_R = \sum J_i \left[1 - \exp(-t / \lambda_i)\right] \qquad \textbf{(2-16)}$$

3) Ambos resortes están completamente extendidos; el constante incremento en la deformación es causado por el pistón P_1. Esta es la región lineal de la capacitancia Newtoniana (J_N). Se prosigue con la ruptura de algunas de las uniones (Sherman, 1970). Esta región está representado por:

$$J_N = t / \eta_N \qquad \textbf{(2-17)}$$

Cuando se remueve el esfuerzo aplicado, el comportamiento de la etapa de recuperación es similar al de la etapa de fluencia si se desprecia la parte del fluido Newtoniano (γ_N). Y la recuperación instantánea elástica es seguida por la recuperación elástica de retardo. Esto es consecuencia de la conducta viscoelástica lineal (Ward, 1990).

La etapa de recuperación del ensayo también puede dividirse en 3 regiones:

1) La muestra reacciona con una espontánea re-formación γ_0, causada por el resorte R_1.
2) El resorte, que aún se encuentra activado, comienza a recuperar su forma; el pistón P_2 vuelve a su estado original.
3) Todos los procesos de re-formación finalizan y la deformación remanente es debida al pistón P_1.

Utilizando el modelo de Kelvin Voigt Generalizado para modelar la curva J(t) se obtiene la siguiente ecuación (Sherman, 1970):

$$J(t) = J_0 + J_1 (1 - e^{-t/\lambda 1}) + J_2 (1 - e^{-t/\lambda 2}) + \ldots + J_n (1 - e^{-t/\lambda n}) + t/\eta_N \qquad \textbf{(2-18)}$$

- **Ensayos oscilatorios**

En los ensayos dinámicos oscilatorios, las muestras se someten a un esfuerzo o a una deformación de cizalla que varía en forma armónica (generalmente sinusoidal) (Ferry, 1980). Por lo tanto existen dos posibilidades:

- Se impone un esfuerzo pequeño a una muestra y se mide la deformación,
- Se impone una deformación fija y se mide el esfuerzo desarrollado por la muestra.

Si se aplica una deformación sinusoidal (< 1%) sobre la muestra se obtiene:

$$\gamma = \gamma_0 \, \mathrm{sen}(\omega t) \qquad \textbf{(2-19)}$$

Donde: γ_0 es la amplitud de la deformación y ω es la frecuencia de oscilación.

Al realizar un ensayo oscilatorio con un reómetro dinámico el rotor, tanto del plato o del cono superior, se mueve alternativamente con un pequeño ángulo de deflexión (φ) hacia la izquierda y hacia la derecha, con una dependencia sinusoidal del tiempo.

La muestra sufre la máxima deformación en los puntos donde R (radio de la muestra) es igual a r (diámetro del sensor), por lo tanto:

$$\gamma_0 = \gamma_R = 2\pi R\left[\frac{\varphi}{2\pi}\right]\frac{1}{h} = \frac{R\varphi}{h} \qquad \textbf{(2-20)}$$

Donde: R es el radio de la muestra, h es la altura de muestra y φ el ángulo de deflexión.

La respuesta de los diferentes tipos de materiales durante los ensayos dinámicos se detalla a continuación:

Sólido elástico:

Como se ha mencionado, un sólido elástico ante un esfuerzo de cizalla responde a la Ley de Hooke y es representado mecánicamente a través de un resorte.
Aplicando una deformación sinusoidal durante el ensayo dinámico:

$$\gamma = \gamma_0 \text{ sen } (\omega t) \qquad \textbf{(2-21)}$$

Según la Ley de Hooke :

$$\tau = G\,\gamma \qquad \textbf{(2-22)}$$

Donde el G, es el módulo de cizalla ó módulo de rigidez. Reemplazando γ en la ecuación anterior se obtiene:

$$\tau = G\,(\gamma_0 \text{ sen}(\omega t)) \qquad \textbf{(2-23)}$$

Por lo tanto se observa que para un sólido elástico la deformación y el esfuerzo están en fase.

Líquido viscoso ideal

Un líquido viscoso ideal, ante un esfuerzo de cizalla, responde a la Ley de Newton y es representado mecánicamente a través de un pistón.
Según la Ley de Newton:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} = \eta \, d\gamma/dt \qquad \textbf{(2-24)}$$

Derivando la deformación respecto del tiempo:

$$d\gamma/dt = \omega\gamma_0 \cos(\omega t) \qquad \textbf{(2-25)}$$

Reemplazando en la ecuación 2-24.

$$\tau = \eta \, \omega \, \gamma_0 \cos(\omega t) = \eta \, \omega \, \gamma_0 \, \mathrm{sen}(\omega t + \delta) \qquad \textbf{(2-26)}$$

Donde: $\delta = 90^{o}$ es el ángulo de desfasaje

Por lo tanto, se observa que la deformación y el esfuerzo están desfasados 90º.

Materiales viscoelásticos

Los materiales viscoelásticos poseen propiedades que son intermedias entre un sólido elástico y un líquido viscoso, por lo que el ángulo de desfasaje toma valores entre 0º y 90º. Por lo tanto, se consideran las siguientes ecuaciones:

$$\gamma = \gamma_0 \, \mathrm{sen}(\omega t) \qquad \textbf{(2-27)}$$

$$\tau = \tau_0 \cos(\omega t) \qquad \textbf{(2-28)}$$

$$\omega \; (1/s \text{ ó } rad/s) = 2\pi f \qquad \textbf{(2-29)}$$

Donde f = frecuencia (ciclos/s)

En el caso de los materiales viscoelásticos se define el módulo complejo, G*, como la relación entre la amplitud del esfuerzo y la amplitud de la deformación. G* representa a la

resistencia total del material a la deformación aplicada. Tanto el módulo complejo como el ángulo de desfasaje son función de la frecuencia. Entonces se obtiene que (Schramm, 1994):

$$G^* = \left[(G')^2 + (G'')^2\right]^{1/2} = G' + iG'' \qquad \textbf{(2-30)}$$

Módulo elástico ó de almacenamiento $G' = G^* \cos\delta = \tau_0/\gamma_0 \cos\delta$ **(2-31)**

Módulo viscoso ó de pérdida $G'' = G^* \operatorname{sen}\delta = \tau_0/\gamma_0 \operatorname{sen}\delta$ **(2-32)**

El módulo de almacenamiento (componente en fase) está asociado con el almacenamiento y liberación de energía durante la aplicación periódica de la deformación; por el contrario el módulo de pérdida (componente desfasado) está asociado a la disipación de energía como calor.

En la mayoría de los casos, para alimentos sólidos y semisólidos, G´´ es mucho menor que G´. Por consiguiente, G* es aproximadamente igual a G´ (Ward, 1990).

La relación entre la parte viscosa y la parte elástica del material, G´´ / G´, es el valor de la tangente del ángulo de desfasaje (G´´ / G´ = tan δ). A mayor valor de tan δ, el material es relativamente más viscoso y menos elástico, y por lo tanto la mayor parte de la energía utilizada para deformar el material se disipa viscosamente, y el resto se almacena. Por el contrario, a menor valor de tan δ, el material tiene un comportamiento más parecido a un sólido, y por lo tanto las deformaciones serían esencialmente elásticas o recuperables (Rao, 1992). Si una sustancia es puramente viscosa el ángulo de defasaje (δ) es 90º, G´= 0 y G´´ = G*, en cambio si la sustancia es puramente elástica δ es 0º, G´= G* y G´´ = 0.

Para poder utilizar las ecuaciones descriptas anteriormente y para realizar un ensayo no destructivo se debe trabajar dentro del rango viscoelástico lineal (RVL). Para ello, antes de cualquier ensayo dinámico para caracterizar un material, se realiza la determinación del RVL del mismo. Si se llevara a cabo el ensayo oscilatorio fuera del RVL, no se dispondría de ecuaciones diferenciales lineales y la resolución sería compleja. Por otro lado, la muestra se deformaría de tal forma que las uniones moleculares temporarias o los agregados se destruirían, y la mayor parte de la energía adquirida se perdería irreversiblemente como calor. El límite entre el rango lineal y el no lineal se obtiene barriendo al módulo complejo o el módulo elástico (en alimentos sólidos o semisólidos) en función de la amplitud de

deformación ó de esfuerzo; cuando el valor de G* o G' deja de ser constante, significa que se está en la zona no lineal.

La representación gráfica de ambos módulos (G'y G'') en función de la frecuencia de oscilación (barrido de frecuencia) determina el espectro mecánico dinámico del material. Este gráfico es muy útil ya que representa el comportamiento de la microestructura del material considerándose una "huella digital del material".

Los ensayos dinámicos son ampliamente utilizados en la caracterización reológica de distintos alimentos, debido a varias ventajas, entre las cuales se pueden mencionar (Rao, 1992; Schramm, 1994):

- Son ensayos muy rápidos, con mínimos cambios químicos y físicos,
- Brindan información a bajas deformaciones (sensibilidad a transiciones vítreas, "cross-linking", separación de fases, etc.), lo cual asegura una conducta lineal entre la fuerza y la deformación (teorías viscoelásticas lineales),
- Son no destructivos y sus resultados pueden compararse a valores teóricos,
- Son especialmente apropiados para caracterizar materiales viscoelásticos pues informan sobre la componente viscosa y la elástica,
- Las propiedades mecánicas pueden determinarse a varias frecuencias y temperaturas en un tiempo corto,
- Algunos estudios muestran correlación significativa entre los ensayos sensoriales y los dinámicos,
- Los resultados permiten realizar suposiciones estructurales.

A través de los ensayos dinámicos se obtienen medidas viscoelásticas diferentes en comparación con las derivadas del ensayo de fluencia – recuperación. Por tal motivo, ambos ensayos se complementan para describir de manera más amplia los aspectos viscoelásticos de los materiales (Schramm, 1994).

2.4.2.3.2. Ensayos reológicos a grandes deformaciones

Los ensayos reológicos realizados a altas de deformaciones más comúnmente utilizados son: ensayo de compresión uniaxial, ensayo de penetración, ensayo de extrusión y ensayos de doble mordida.

- **Ensayo de doble compresión**

La propuesta de este ensayo (Szczesniak, 1963) y el desarrollo de un texturómetro por los investigadores de General Foods (Friedman y col, 1963) marcaron un antes y un después en las determinaciones de las medidas de textura en los alimentos.

El TPA instrumental es el resultado de comprimir dos veces consecutivas un trozo de alimento, del tamaño de un bocado, mediante un embolo que actúa sobre la muestra con una trayectoria curva. El embolo disminuye su velocidad durante la compresión de la muestras y la aumenta cuando empieza a descomprimir la muestra.

El método propuesto se modificó posteriormente para determinados alimentos pero su verdadera popularidad se produjo cuando Bourne en 1968 lo adaptó para poder realizarlo con un texturómetro Instron. La curva que se obtiene con el texturómetro Instron difiere en algunos aspectos con la curva que se obtiene con el texturómetro de General Foods por las diferencias que existen entre ambos equipos y en su forma de operación, especialmente en lo que se refiere a la dirección de la fuerza aplicada y a la velocidad de la misma (Costell y col., 1997). En el texturómetro de General Foods, la velocidad es variable y en el Instron, la velocidad es constante; la pieza que comprime la muestra se mueve en el primero de forma circular y en el segundo de forma rectilínea (Bourne, 1982).

En este tipo de ensayo se determina la resistencia del alimento a la compresión, hasta su ruptura o hasta una determinada deformación y se observa el comportamiento del alimento. Para la realización de las experiencias, en la mayoría de los casos la muestra de alimento se presenta en forma de cilindro o de cubo y se somete a la acción de un émbolo que se desplaza verticalmente a una velocidad prefijada (Costell y col., 1997).

Debido a la naturaleza viscoelástica de los alimentos, la magnitud desarrollada no es sólo función de la deformación sino también de la velocidad impuesta. La aplicación de

distintas velocidades afecta significativamente la respuesta mecánica del material. La naturaleza de esta variación es característica de cada material. En general, cuanto mayor es la velocidad de deformación, la tensión originada es mayor (Costell y col., 1997).

En un ensayo ideal de deformación uniaxial la relación tensión-tiempo es independiente de las dimensiones del espécimen por definición, pero en la práctica esto no sucede así y varias pueden ser las causas. En algunos materiales reales existen estructuras orientadas (por ejemplo, alimentos fibrosos) que pueden influir en la respuesta del material si alcanzan dimensiones comparables a la del espécimen. La existencia de fuerzas de fricción entre la muestra y las superficies del equipo, hace que el material se comporte con mayor resistencia aparente, lo que probablemente modifique su pauta de deformabilidad dependiendo de sus dimensiones. Por otro lado, muchos materiales biológicos y alimentos contienen líquidos; en ellos, parte de la tensión alcanzada puede deberse al desarrollo de presiones hidrostáticas durante la compresión. La disipación de estas tensiones dependerá de la naturaleza porosa, la densidad o la microestructura de la matriz del material. En estos casos, especímenes con mayores diámetros desarrollarán mayores tensiones aparentes (Costell y col., 1997).

Del registro de la respuesta fuerza – tiempo se obtiene un curva similar a la de la **Figura 2-12**. El primer pico abrupto que observa durante la primera compresión está asociado a la fracturabilidad. La fuerza máxima que se observa durante la primera compresión está asociado a la dureza. La fuerza máxima que se observa durante la segunda compresión está asociada a la dureza de la segunda compresión. La relación entre el A_2 y el A_1 representa la cohesividad de la muestra. El área negativa (A_3) de la curva correspondiente a la primera descompresión representa la adhesividad. La relación entre altura que la probeta o muestra recupera durante el tiempo que transcurre entre el final de la primera compresión y el comienzo de la segunda compresión representa la elasticidad.

Además de los seis parámetros explicados, extraídos directamente de las curvas obtenidas, la combinación de algunos de ellos dan valores que explican otros atributos sensoriales, como la gomosidad, con el producto de la dureza por la cohesividad o la masticabilidad, con el producto de la gomosidad por la elasticidad (Bourne, 1978).

Los parámetros texturales obtenidos con el texturómetro de General Foods correlacionaron adecuadamente con los atributos sensoriales correspondientes (fracturabilidad,

dureza, gomosidad, masticabilidad, viscosidad, adhesividad) (Szczesniak, 1963).

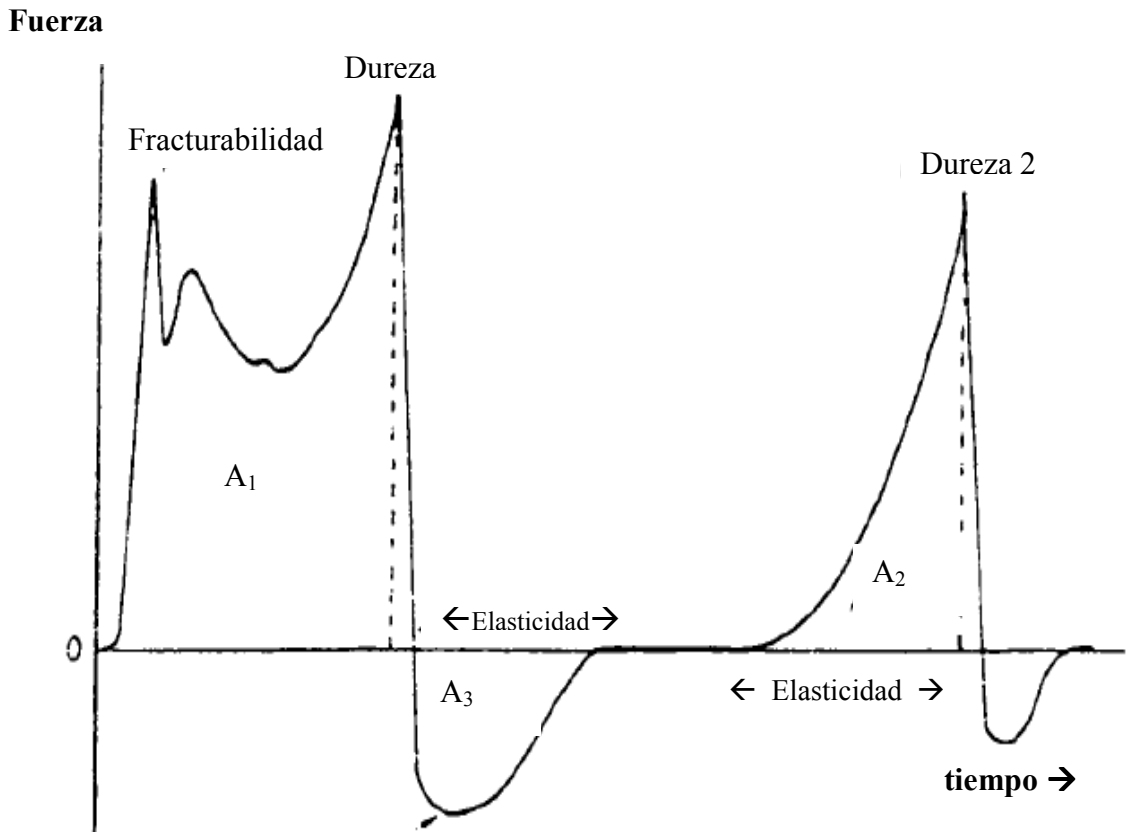


Figura 2-12. Perfil de Textura obtenido con el texturómetro Instron (Bourne 2002).

Bourne y Comstock (1981) estudiaron el efecto del grado de compresión sobre los parámetros del Perfil de Textura en algunos alimentos representativos (pretzel, zanahoria, manzana, salchicha y queso crema). Ellos encontraron que la fracturabilidad no depende del grado de compresión dentro del rango de 50-100% de compresión. En el caso de la dureza para las muestras más duras encontraron que para compresiones entre el 50 y 80 % la dureza es independiente del grado de compresión. Superando el 80% de compresión aumenta la dureza con el aumento de la compresión. Para este parámetro es importante señalar que entre el 50 y 80 % de compresión la dureza y la fracturabilidad están asociadas al mismo pico máximo, mientras que superando el 80 % el primer pico registrado se asocia a la fracturabilidad y el pico máximo (final de la primera compresión) a la dureza (**Figura 2-13**). La dureza asociada a la segunda compresión (pico máximo) y el área 1 aumentan con el grado de compresión entre el 50 y 100% de compresión.

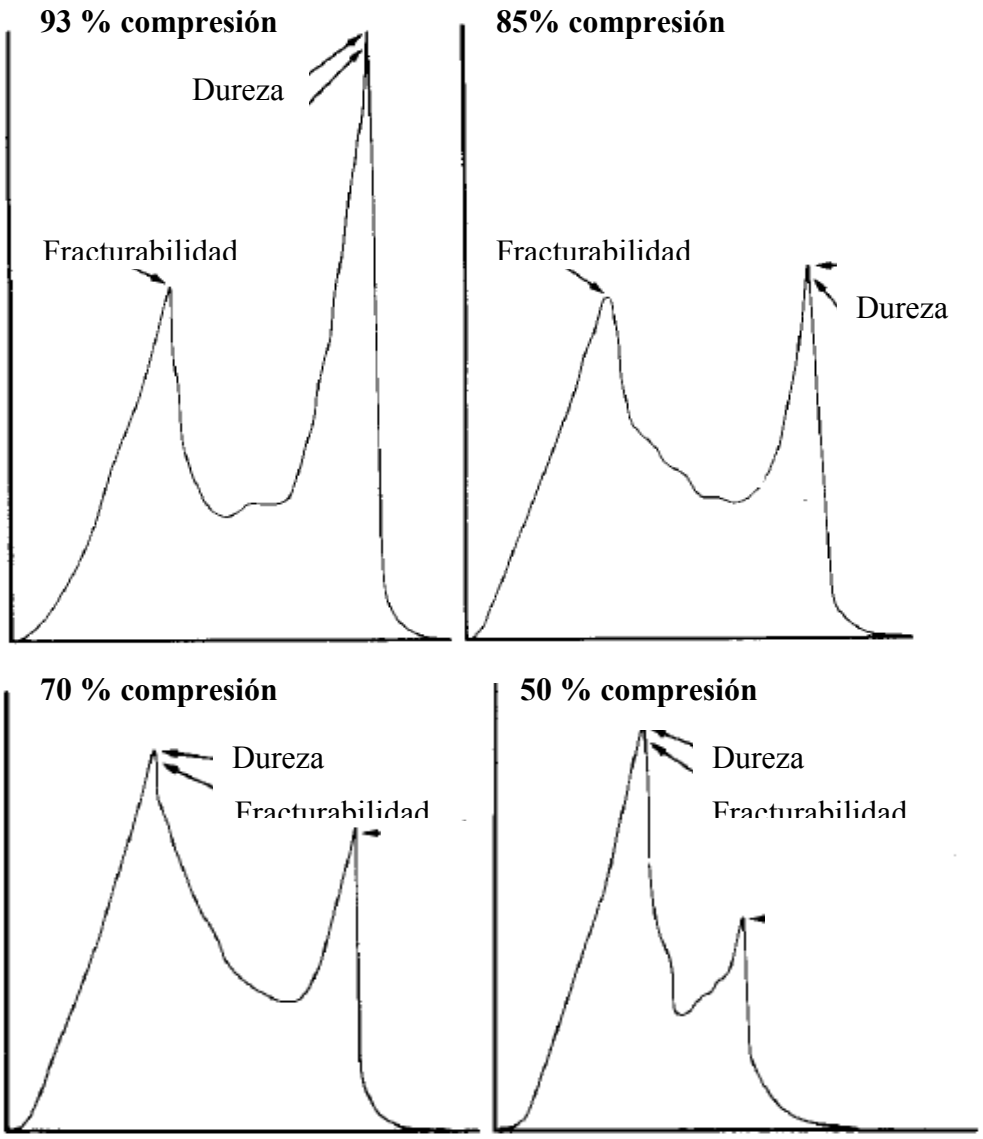


Figura 2-13. Curvas fuerza-tiempo para distintos porcentajes de compresión (Bourne, 1981).

En alimentos, el término módulo de deformabilidad (E_d) es usado en vez de módulo de elasticidad, y se obtiene de la pendiente de la curva de esfuerzo vs deformación en un rango de deformación definido donde la deformación se aproxima a cero (Monhsenin & Mittal, 1977) o de la región lineal de la curva si es que existe (Rebouillat & Peleg, 1988).

Para poder determinar el modulo de deformabilidad, la primera parte de las curvas de fuerza vs tiempo deben ser transformadas en curvas de esfuerzo vs deformación. Pero debido a que estos ensayos se realizan en la región de altas deformaciones, el área de exposición a la fuerza se expande considerablemente durante la compresión y por lo tanto no puede ser aproximada al área original (Calzada & Peleg, 1978).

Teniendo en cuenta el cambio del área a lo largo del ensayo, el esfuerzo normal puede ser expresado como el esfuerzo real (σ_R)

$$\sigma_R = \frac{F(t)}{A(t)} \qquad \textbf{(2-33)}$$

donde A (t) es el valor del área del espécimen deformado a un tiempo (t) de iniciado el ensayo. Si se supone que el valor del volumen permanece constante, la ecuación (2-31) puede expresarse:

$$\sigma_R = \frac{F(t)\left[H_0 - \Delta H(t)\right]}{A_0 H_0} \qquad \textbf{(2-34)}$$

donde H_0 es la altura inicial del espécimen, ΔH es la disminución absoluta de la altura inicial del espécimen en la dirección de la fuerza aplicada y A_0 es el área inicial de la muestra.

La deformación normal (ε) puede ser expresada como la deformación real definida por Hencky (ε_R) según:

$$\varepsilon_R = \ln\left(\frac{H_0}{H_0 - \Delta H}\right) \qquad \textbf{(2-35)}$$

Como se mencionó anteriormente, el módulo de elasticidad (E) es el esfuerzo dividido la deformación en la región elástica o lineal. Pero debido a que los alimentos son básicamente materiales viscoelásticos no lineales, en los ensayos de compresión, en general, no presentan una región lineal bien definida. Existen excepciones; por ejemplo, las manzanas usualmente tienen una región lineal definida en la compresión (Rebouillat & Peleg, 1988).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materia prima

Para realizar esta tesis se utilizaron manzanas (*Malus pumila*, variedad Granny Smith, a_w = 0,98 ± 0,01, sólidos solubles = 12 ± 1 ºBrix, pH = 3,5 ± 0,3) y peras (*Pyrus communis*, variedad William´s, a_w = 0,98 ± 0,03, sólidos solubles = 12,7 ± 1,0 ºBrix, pH = 4,0 ± 0,3) adquiridas en un local comercial. Para los ensayos realizados las manzanas y peras fueron elegidas teniendo en cuenta el tamaño, la forma y el contenido de sólidos solubles (°Brix), de modo tal de trabajar con un lote homogéneo de frutas. De esta manera se trató de evitar la variabilidad debido al estadio de madurez y/ó el estado de conservación. Las frutas fueron almacenadas en refrigeración (5°C ± 1) hasta dos horas antes de su utilización.

3.2. Preparación de las muestras

Las manzanas y las peras fueron lavadas en agua, peladas y cortadas utilizando una cortadora manual. Para las mediciones del espesor se utilizó un micrómetro Teclock (± 0,01 cm) (Teclock Corporation, Japón). La **Figura 3-1** muestra la metodología del corte de ambas frutas. Las muestras control (manzana y pera frescas) y las muestras a ser tratadas por radiación UV-C y pulsos de luz se cortaron de 1,0 cm de espesor. Las muestras tratadas térmicamente y/o osmotizadas (**sección 3.3.3.1 y sección 3.3.3.2** respectivamente) presentaron un ligero encogimiento (aprox. 3 cm de diámetro y 0,9 cm de espesor) debido al tratamiento, por lo que inicialmente se cortaron con un espesor de 1,1cm para lograr un espesor final de 1,0 cm. Las muestras utilizadas en los ensayos de deshidratación osmótica se cortaron en láminas (4 cm de lado x 1,1 cm de espesor) y luego del tratamiento se cortaron en rodajas de 3 cm de diámetro con un sacabocado cilíndrico de acero inoxidable.

3.3. Tratamientos

3.3.1. Tratamientos volumétricos

3.3.3.1. Tratamientos térmicos

Los cilindros de manzana fueron escaldados en vapor a presión atmosférica durante 90 y 150 segundos (E1 y E2 respectivamente); inmediatamente después del tratamiento fueron enfriados en agua destilada a 5ºC durante 3 minutos.

3.3.3.2. Deshidratación osmótica con glucosa

La deshidratación osmótica con glucosa fue realizada a presión atmosférica en el tejido fresco (DOA) y en el escaldado 90 s (E+DOA). Las placas de manzana se sumergieron en una solución acuosa de glucosa de concentración 22,1 % p/p (a_w = 0,97). El pH de la solución se ajustó a un valor de 3,5 con ácido cítrico y se agregó al medio 2000 ppm de sorbato de potasio con el propósito de inhibir y/o retardar el desarrollo microbiano. El tratamiento se realizó en un recipiente con agitación forzada a 20 ºC hasta que el contenido de sólidos solubles y la humedad fueron aproximadamente constantes (≅ 6 ½ horas). Para determinar el tiempo de deshidratación se realizaron experiencias previas en las que se tomaban muestras osmotizadas a diferentes tiempos (60, 120, 180, 240, 300 y 360 minutos) hasta alcanzar la a_w deseada. El grado de agitación fue el necesario para asegurar control interno a la transferencia de masa.

La concentración de glucosa adecuada para alcanzar a_w 0,97 se determinó a través de la ecuación de Norrish (1996):

$$a_w = x_1 \exp(-K\, x_2^2) \qquad \textbf{(3-1)}$$

Donde: a_w es la actividad de agua de la solución; x_1 es la fracción molar de agua; x_2 es la fracción molar de soluto y K es la constante de Norrish.

El valor de K utilizado para glucosa fue 2,25 y para sacarosa 6,47 (Chirife y col., 1980). Se utilizó una gran relación jarabe/fruta (60/1) para minimizar el efecto de la dilución de la solución de inmersión por el agua proveniente de la deshidratación de la fruta.

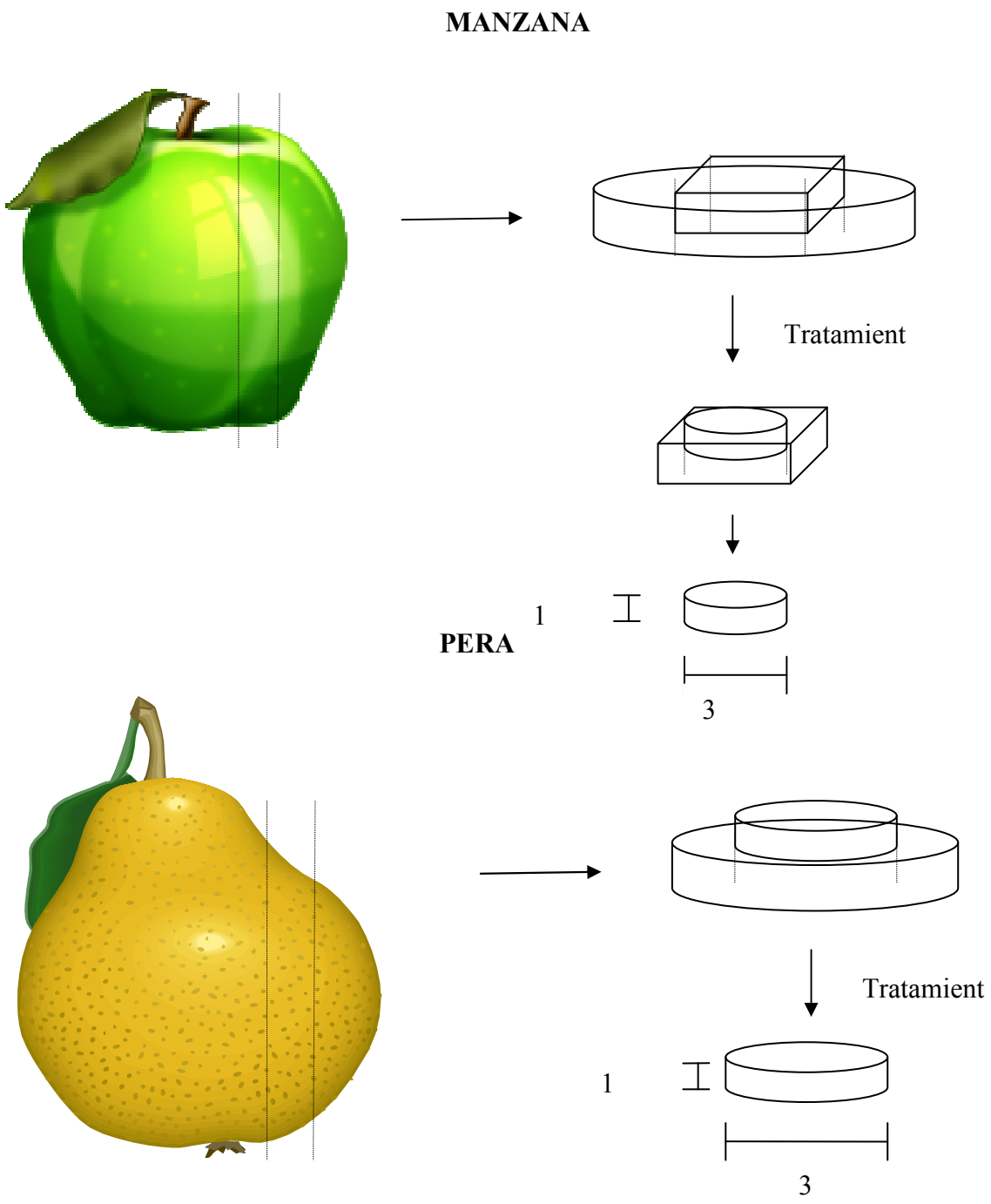


Figura 3-1. Esquema de pasos para el corte de muestras de manzana y pera.

Finalizada la deshidratación osmótica, las muestras se removían de la solución y se sumergían en agua destilada durante aproximadamente 20 segundos; luego se pasaban vuelta y vuelta sobre un papel absorbente para eliminar el jarabe que quedaba en la superficie de la muestra y eran almacenadas bajo refrigeración (4-5 ºC) en bandejas plásticas de polietileno (PET) de alta densidad con tapa permeable durante 12 horas. Posterior al almacenamiento se realizaban los análisis.

3.3.3.3. Adición de calcio

A las soluciones de glucosa que se utilizaron para la impregnación a presión atmosférica se les agregó 0,1 % p/p de lactato de calcio. Luego el tratamiento llevado a cabo posteriormente fue similar al descripto en la sección 3.3.3.2 en tejido manzana fresco (DOA+Ca^{+2}) y en el escaldado 90 s (E+DOA Ca^{+2}).

3.3.2. Tratamientos superficiales

Las muestras de manzana sometidas a los tratamientos superficiales (irradiación con luz ultravioleta de onda corta y pulsos de luz) combinada con un pretratamiento de antipardeamiento y las muestras control (manzana fresca sin tratamiento), fueron almacenadas en bandejas plásticas de polietileno (PET) de alta densidad con tapa permeable al aire a 4–5 ºC durante 5 días. Posterior al almacenamiento se realizaron los análisis. Las muestras de pera fueron tratadas y luego analizadas.

3.3.2.1. Aplicación de luz ultravioleta de onda corta

3.3.2.1.1. Descripción del equipo

La cabina de exposición a la luz UV-C poseía dos lámparas germicidas (máxima emisión a 253,7 nm, TUV- 15W G13 T8 55V, Philips, Holanda) colocadas en posición horizontal dentro de una caja de madera herméticamente cerrada (40 cm de alto x 100 cm de largo x 30 cm de ancho). Las muestras a ser irradiadas se ubicaban sobre un estante forrado

con papel aluminio colocado a 10 cm de distancia por debajo de las lámparas. La cabina contaba con un sistema de ventilación (ventilador Ecoclima, Argentina)) para evitar el incremento de temperatura producido por la radiación UV-C. La temperatura promedio alcanzada durante los tratamientos fue de 29 ± 2 °C. Antes de su uso las lámparas se dejaban estabilizar prendidas durante 15 minutos (**Figura 3-2**).

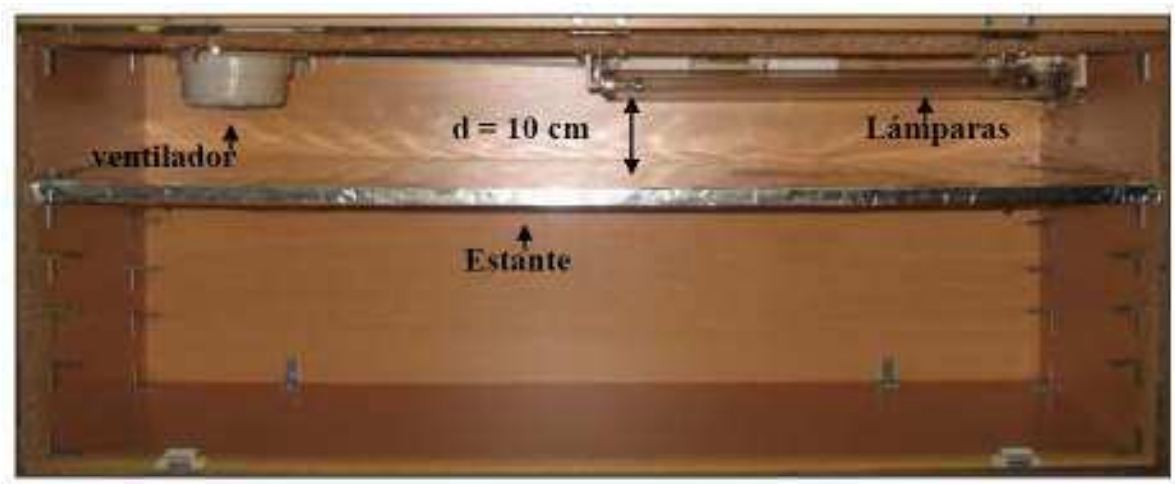


Figura 3-2. Cabina de radiación UV-C.

3.3.2.1.2. Tratamientos de radiación UV-C

Los tiempos de exposición a la radiación UV-C utilizados en los ensayos fueron seleccionados teniendo en cuenta los estudios realizados en la tesis titulada "Procesamiento mínimo de manzana: Efecto de la radiación UV-C y la luz pulsada de alta intensidad sobre la calidad" por Gómez (2010) para manzana y en la tesis titulada "Preservación de productos frutales mínimamente procesados mediante la aplicación de luz UV y su combinación con otras tecnologías emergentes" por Schenk (2010) para pera. Los tiempos de irradiación utilizados fueron 25 minutos (dosis ≈ 11,2 kJ/m^2) para manzana y 7,5 minutos (dosis ≈ 3,8 kJ/m^2) para pera.

La irradiación se realizó en rodajas frescas de manzana y pera y en rodajas pretratadas (**secciones 3.3.2.3.1 y 3.3.2.3.2**). Las muestras fueron irradiadas sobre una de sus caras y las mediciones instrumentales se realizaron sobre esa parte expuesta.

3.3.2.2. Aplicación de pulsos de luz de alta intensidad

3.3.2.2.1. Descripción del equipo

Se utilizó un sistema de esterilización Steripulse-XL modelo RS-3000B (Xenón Corporation, Woburn, MA, EEUU), compuesto por un módulo controlador RC747 y una lámpara de xenón (no tóxica, libre de mercurio) que emitía pulsos de luz de alta energía en un rango de longitud de onda entre 200 y 1100 nm. La lámpara (41 cm de largo) estaba montada dentro de una caja metálica (19 cm de alto x 76,2 cm de largo x 17,9 cm de ancho), la cual contenía una ventana de cuarzo en uno de sus lados para dejar pasar la luz emitida, un sistema de enfriamiento para evitar el sobrecalentamiento de la lámpara durante su uso y un sistema eléctrico de conexión de la lámpara al módulo controlador. El sistema de enfriamiento consistía en un ventilador que suministra aire filtrado a través de un conducto metálico conectado a la caja de la lámpara y dos filtros, ubicados en la parte superior de la misma, por donde se removía el aire suministrado sin permitir el paso de luz. A su vez, la caja estaba dispuesta en forma horizontal sobre una cabina de acero inoxidable (40 cm de alto x 76,2 cm de largo x 20 cm de ancho) herméticamente cerrada, que disponía de estantes ubicados a 5, 10 y 15 cm de la lámpara (**Figura 3-3**). El sistema liberaba pulsos de luz UV-Visible a una velocidad fija de 3 pulsos por segundo, siendo la energía de cada pulso de 1,27 J/cm^2 a 1,92 cm de la lámpara (datos provistos por el fabricante). El ancho de pulso (duración de cada pulso) era de 360 μs.

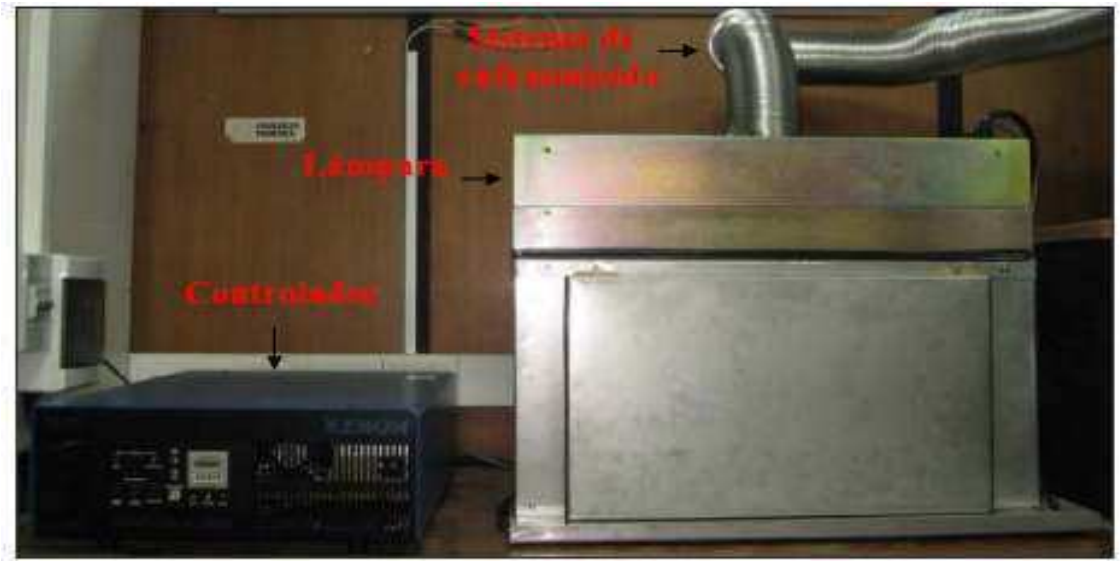


Figura 3-3. Equipo de pulsos de luz.

3.3.2.2.2. Tratamientos de irradiación con luz pulsada

Las rodajas de manzana (fresca o con solución antipardeamiento) fueron colocadas a 10 cm de la lámpara e irradiadas durante 60 segundos (Gómez y col, 2010). Como la luz no incidía de manera homogénea sobre todo el estante, para asegurarse que la irradiación de las muestras en los tratamientos fuera uniforme, estas fueron ubicadas siempre en fila debajo de la lámpara y a una distancia no mayor de 10 cm del punto central de la lámpara.

3.3.2.3. Pretratamientos

3.3.2.3.1. Inmersión en soluciones antipardeamiento

Con el objetivo de evitar el pardeamiento superficial de las muestras se realizó un pretratamiento con una solución antipardeamiento (cloruro de calcio/ácido ascórbico). Las soluciones se prepararon con ácido ascórbico (1 % p/v, grado alimentario, Química Oeste S.A, Argentina) y cloruro de calcio (0,1% p/v, grado alimentario, Saporiti S.A, Argentina) a pH 3,5. La inmersión se realizó en las muestras frescas de pera y manzana, antes de los tratamientos de irradiación, durante 3 y 5 minutos a 4-5 ºC (Ponting y col., 1972) respectivamente.

3.3.2.3.2. Inmersión en una solución de peróxido de hidrógeno (H_2O_2)

Con el objetivo de reducir la carga microbiana se utilizó H_2O_2 (30 % v/v, grado analítico, Biopack, Argentina) en un buffer que se preparó a partir de una solución de ácido cítrico monohidrato 0,1 M (grado analítico, Anedra, Argentina) y Na_2HPO_4 0,2M. Se mezclaron distintas proporciones para obtener un buffer de pH final 3,0 y se agregó un volumen de H_2O_2 para llegar a una concentración del 3 % v/v. Las rodajas de pera (con pretratamiento previo) fueron sumergidas en la solución durante 5 minutos. Transcurrido este tiempo las muestras fueron enjuagadas con agua destilada y secadas con papel absorbente, e inmediatamente irradiadas con luz UV-C.

En la **Figura 3-4** se detalla un esquema completo con todos los tratamientos de manzana y pera realizados en esta tesis.

3.4. Determinación de la actividad de agua

Para la determinación de la a_w se utilizó un medidor AquaLab modelo CX-2 (Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA; sensibilidad = ± 0,01), basado en la detección del punto de rocío. El equipo fue calibrado con soluciones salinas saturadas de a_w conocida en el rango de medición, de acuerdo al procedimiento seguido por Roa y Tapia de Daza (1991). Para la preparación de las soluciones se utilizaron reactivos de calidad analítica: sulfato de potasio, cloruro de potasio y nitrato de potasio (Merck Química Argentina S.A.I.C., Argentina) y cloruro de bario (Mallinckrodt Chemical Works, USA). Las determinaciones se realizaron sobre un puré de la muestra a 20,0 ºC ± 0,5 ºC por triplicado y se informan los valores promedio.

Los valores de a_w de las soluciones tomadas como referencia son mostradas en la **Tabla 3-1** (Resnik y Chirife., 1988).

Tabla 3-1: Valores de a_w de distintas soluciones salinas saturadas.

Solución salina saturada	a_w (25 ºC)
KCl	0,843
$BaCl_2$	0,902
KNO_3	0,926
K_2SO_4	0,974

3.5. Determinación del contenido de sólidos solubles

Un refractómetro Atago modelo PR 101 (Atago CO, Japón) se utilizó para determinar el contenido de sólidos solubles. Las determinaciones se realizaron por triplicado y se expresaron los valores promedio como ºBrix (±0,1).

3.6. Determinación del pH

Para la determinación del pH se utilizó un potenciómetro (ORION PerpHecT Meter 310, Inglaterra; sensibilidad = ± 0,1) calibrado con buffers de pH 4,0 y 7,0 (Anedra, Argentina).

Figura 3-4. Esquema de los tratamientos realizados.

3.7. Análisis sensorial

3.7.1. Análisis del perfil de textura

Se evaluó el efecto de los distintos tratamientos a través de la textura oral utilizando el método del Perfil de Textura. Para ello se seleccionó y entrenó un panel de evaluadores. Las mediciones se realizaron en una habitación con iluminación homogénea, temperatura controlada y libre de posibles distracciones y olores. La misma estaba dividida en dos sectores: una zona de entrenamiento para discusión en la modalidad de mesa redonda y otra de análisis de las muestras. El sector de análisis estaba dividido en seis cabinas blancas provistas con los materiales necesarios para realizar los análisis requeridos. Contigua a la habitación de evaluación se ubicaba la sala de preparación de las muestras y los materiales para los análisis. A continuación se detallan las diferentes etapas del método utilizado.

3.7.1.1. Reclutamiento de evaluadores

Se convocó a personal estable del Departamento de Industrias de la Universidad de Buenos Aires. A cada uno se le informó los objetivos de la investigación, el tiempo que les iba a insumir durante y después del reclutamiento, y los procedimientos generales que se iban a utilizar. Durante el período de reclutamiento se tuvieron en cuenta los aspectos psicológicos como el interés del candidato por el objetivo propuesto, la predisposición, la disponibilidad de tiempo y la capacidad para interactuar con el resto del grupo (Civille y Szczesniak, 1973).

3.7.1.2. Selección de los evaluadores

Para la constitución del panel se realizaron diferentes pruebas de selección donde se evalúo la habilidad para detectar y describir diferencias en los alimentos evaluados. A continuación se detallan las prueban utilizadas en esta etapa:

a) Encuesta personal

Los candidatos interesados en participar en el panel llenaron una encuesta personal destinada a recabar sus datos y establecer la presencia de factores de importancia en la selección, tales como dietas, estado de salud y hábitos alimenticios, además de detectar posibles incompatibilidades o alteraciones en la percepción (Meilgaard y col., 2006). Además, se incluyó una sección compuesta por ocho preguntas en la cual se evaluaron conceptos fundamentales sobre la textura a fin de obtener información preliminar del conocimiento de los candidatos (**Figura 3-5**). Se encuestaron dieciocho candidatos, los cuales se sometieron luego a las pruebas de evaluación.

Cuestionario de selección de integrantes para un panel de textura oral
Datos generales: Nombre: Dirección: Lugar de trabajo: Teléfono: Correo electrónico: **Disponibilidad:** 1. ¿Qué días de la semana está disponible? 1. ¿En los días que está disponible, hay algún horario en que no puede estar disponible?
Salud: 1. ¿Posee usted alguna de las siguientes enfermedades? Diabetes ☐ Hipoglucemia ☐ Alergias alimentarias ☐ Hipertensión ☐ Enfermedades en la cavidad oral (llagas, herpes) ☐ Usa dentaduras postizas ☐ 2. ¿Toma alguna medicación que afecte su percepción sensorial, especialmente gusto o tacto? ☐
Hábitos alimentarios: ¿Está siguiendo alguna dieta específica? En caso afirmativo detalle. ¿Cuán frecuentemente come afuera al mes? ¿Cuán frecuentemente come en locales de comida rápida al mes?

Cuestionario de selección de integrantes para un panel de textura oral
¿Cuantas veces al mes come alimentos congelados? ¿Cuál es su comida preferida? ¿Cuál es su comida menos preferida? ¿Qué alimentos no puede consumir? ¿Qué alimentos no le gusta consumir?
¿Cómo considera su sensibilidad a las características texturales de un alimento? Mejor que el promedio ☐ Promedio ☐ Por debajo del promedio ☐ **Preguntas sobre textura:** ¿Cómo describiría la diferencia entre sabor y textura? Describa algunas de las propiedades texturales generales de los alimentos. Describa algunas de las partículas que puede encontrar en los alimentos. Describa que propiedades son evidentes cuando mastica un alimento. Enumere algunas de las características texturales de las papas fritas. Enumere algunas de las características texturales del dulce de leche. Enumere algunas de las características texturales del pan. ¿Para qué tipo de productos es importante la textura?

Figura 3-5. Encuesta personal para la selección de los evaluadores de un panel de textura oral (Meilgaard y col., 2006).

b) Reconocimiento de gustos básicos

Se evaluó la sensibilidad de los candidatos para los gustos dulce (sacarosa), salado (NaCl), amargo (cafeína) y ácido (ácido cítrico) siguiendo el método propuesto por Jellinek (1985). A cada candidato se le entregó soluciones acuosas patrones en vasos de plástico de 200 ml indicando el sabor en el rotulo con el objetivo de que pudieran reconocer los gustos básicos antes de evaluar las soluciones incógnita. Luego se le entregaron 10 muestras incógnitas de las soluciones patrones en diferentes concentraciones, siguiendo la metodología del ensayo utilizado.

Se utilizaron dos series de diluciones en sesiones separadas: geométrica de razón 2 y aritmética. La serie geométrica, de razón 2, se utiliza en la práctica corriente siendo la

diferencias entre las muestras más groseras. La serie aritmética, de intervalos más estrechos, tiene por objeto detectar los umbrales y obtener una mayor precisión en la agudeza gustativa. Las concentraciones de las diferentes series de gustos utilizados se detallan en las **Tablas 3-2, 3-3 y 3-4.**

A cada evaluador se le indicó las áreas de la lengua donde se detectan mejor los gustos, con el objetivo de que los candidatos se concentraran en esas áreas durante la evaluación (**Figura 3-6**). También se le indicó que se debían tomar pequeños sorbos y distribuirlos por toda la lengua y el paladar y que las soluciones no se debían tragar sino que debían desecharse en el bebedero. Como neutralizante entre muestra y muestra se utilizó agua mineral (marca Villa del Sur). Todos los reactivos utilizados durante esta prueba fueron de grado analítico (Merck Analítica Argentina S.A, Argentina). En la **Figura 3-7** se muestra la planilla utilizada durante la prueba con las explicaciones necesarias para los candidatos.

Finalizada la prueba se contabilizaron los evaluadores que tenían un 60% de acierto en los gustos básicos en las dos series, los cuales continuarían con las pruebas de selección.

Tabla 3-2. Soluciones patrón para gustos básicos.

Sabor	Sustancia patrón	Concentración (g/l)
Ácido	Ácido cítrico	1 ó 2
Amargo	Cafeína	1
Salado	Cloruro de sodio	8
Dulce	Sacarosa	32

Tabla 3-3. Serie de diluciones geométricas de razón 2.

Código	Gusto básico	Concentración (g/l)
A	Ácido	0,3
B	Dulce	4
C	Ácido	0,4
D	Amargo	0,2
E	Salado	0,8
F	Dulce	6
G	Agua	0
H	Amargo	0,3
J	Ácido	0,5
K	Dulce	8

Tabla 3-4. Serie de diluciones aritméticas.

Código	Gusto básico	Concentración (g/l)
M	Acido	0,3
N	Amargo	0,2
O	Dulce	6
P	Acido	0,4
Q	Agua	0
R	Amargo	0,3
S	Salado	0,8
T	Dulce	8
U	Salado	1,5
V	Amargo	0,4

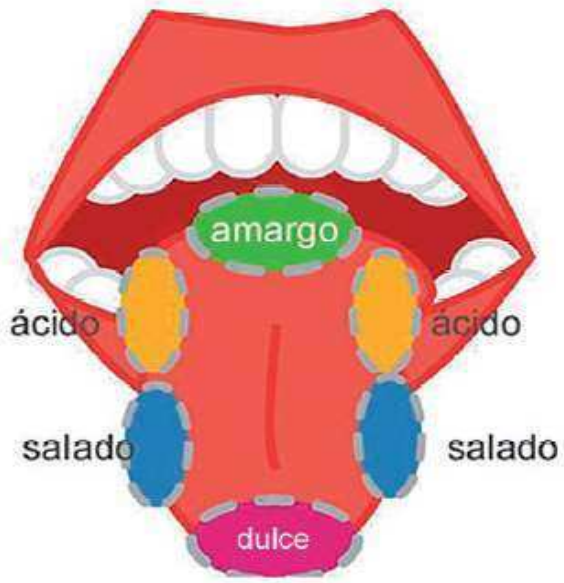


Figura 3-6. Esquema de los gustos básicos detectados en la lengua.

c) Prueba secuencial de triángulo

Las pruebas secuenciales están diseñadas para reducir el número de evaluaciones necesarias para llegar a una conclusión sobre aceptación o rechazo en casos como la selección de un panel de evaluadores o la salida al mercado de un lote de producto (Meilgaard y col., 2006). El objetivo de esta prueba fue evaluar la sensibilidad de los evaluadores para detectar pequeñas diferencias en pares de alimentos muy similares.

Cada triángulo estaba formado por tres muestras donde dos de ellas eran iguales y una diferente. El candidato debía detectar cual era la diferente. Se realizaron 4 sesiones de 5 triángulos cada una. Las muestras fueron presentadas en vasos de plásticos de 150 ml codificadas con números de tres dígitos elegidos al azar. Como neutralizante se utilizó agua mineral. La consigna de la prueba y su correspondiente planilla se detallan en la **Figura 3-8**.

Nombre y Apellido:…….

Fecha: ……

Usted ha recibido soluciones acuosas en bajas concentraciones de sacarosa (dulce), cloruro de sodio (salado), ácido cítrico (ácido) y cafeína (amargo). Su tarea consiste en reconocer cada gusto básico, teniendo en cuenta las consideraciones antes nombradas. Cuando la muestra tenga gusto a agua (concentraciones menores que su umbral) marque 0. Si le parece que la muestra es distinta al agua pero no distingue el sabor marque "?".

Las muestras no deben tragarse. Se deben evaluar de izquierda a derecha.

En lo posible, pruebe las muestras una sola vez, confiando en esta primera impresión.

Entre muestra y muestra enjuague la boca con agua.

Código	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
Gusto										

Espere cinco minutos y evalué la segunda fila

Código	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
Gusto										

Figura 3-7. Planilla utilizada en la prueba de gustos básicos.

NOMBRE:.....

EVALUADOR Nº..... FECHA: .../.../...

Ud. recibirá dos grupos de tres muestras. En cada grupo, dos de estas muestras son idénticas y la otra es diferente. Pruebe las muestras de izquierda a derecha y todas las veces que sea necesario para poder formular su respuesta.

Por favor, circule el número de la muestra diferente

Si no encuentra la diferencia deberá igualmente elegir una.

365 162 871

Figura 3-8. Planilla utilizada en la prueba de triángulo**.**

Para armar los triángulos, los pares de alimentos utilizados debían ser muy similares y se debían presentar bajo las mismas condiciones para que el evaluador no seleccionara el diferente por su apariencia. Los pares de alimentos utilizados se detallan en la **Tabla 3-5.**

Tabla 3-5. Pares de alimentos utilizados en la prueba del triángulo.

Producto	Marca	Temperatura (ºC)
Leche entera UHT	Las Tres Niñas/La Serenisima	4-5
Gaseosa	Coca Cola/Pepsi Cola	4-5
Yogurt entero firme de vainilla	La Serenisima /Sancor	4-5
Chocolate de taza semiamargo rallado	Aguila/ Godet	Ambiente

Los resultados se evaluaron utilizando el gráfico descripto en la **Figura 3-9** en el cual se grafica el número de pruebas realizadas en el eje de las abscisas (x) y el número de respuestas correctas en el de las ordenadas (y). Este gráfico presenta tres zonas demarcadas por ecuaciones de probabilidad (**Ecuaciones 3-7 y 3-8**): región de aceptación, región de rechazo y región de continuación de la prueba. Para cada prueba se ingresó el valor (1,1) si fue correcta y el valor (0,1) para las incorrectas. Para la prueba siguiente se incrementó el valor de x en una unidad. De esta manera al final de cada sesión se ingresaron 5 puntos a la gráfica por cada candidato. Una vez que el candidato entraba en la zona de aceptación no continuaba

evaluando los triángulos y pasaba a la siguiente fase del entrenamiento. Cuando un candidato entraba en la zona de rechazo no continuaba con las pruebas de selección.

$$d_0 = \frac{\log\beta - \log(1-\alpha) - n \cdot \log(1-\rho_1) + n \cdot \log(1-\rho_0)}{\log\rho_1 - \log\rho_0 - \log(1-\rho_1) + \log(1-\rho_0)} \qquad \textbf{(3-2)}$$

$$d_1 = \frac{\log(1-\beta) - \log\alpha - n \cdot \log(1-\rho_1) + n \cdot \log(1-\rho_0)}{\log\rho_1 - \log\rho_0 - \log(1-\rho_1) + \log(1-\rho_0)} \qquad \textbf{(3-3)}$$

Donde:

α: probabilidad de identificar una diferencia cuando no existe.

β: probabilidad de no reconocer una diferencia cuando existe.

ρ_0: proporción esperada de decisiones correctas cuando las muestras son iguales.

ρ_1: proporción esperada de decisiones correctas cuando la muestra diferente es detectada (no por adivinación) en la mitad del total de las pruebas.

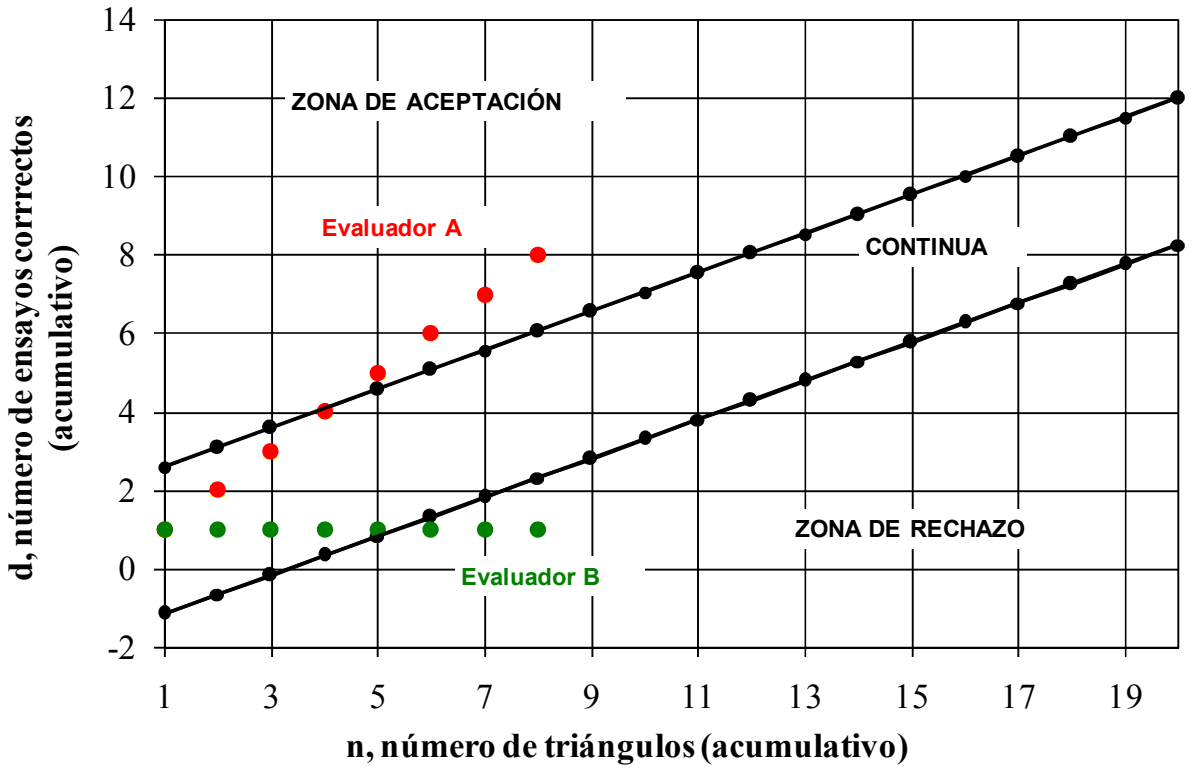


Figura 3-9. Gráfico de aceptación o rechazo utilizado en la prueba del triángulo. Las rectas se representaron a partir de los siguientes valores: α=0,05; β=0,10; ρ_0=0,33 y ρ_1=0,66 (Meilgaard y col., 2006). (●) Evaluador aceptado, (●) Evaluador rechazado.

d) Reconocimiento fisiológico en textura

Con el fin de determinar la existencia de alguna anormalidad o deficiencia en la percepción de la textura se utilizó la prueba de ordenamiento de textura descripta por Civille y Szczesniak (1973). A cada candidato se le presentaron cuatro muestras (maní, zanahoria fresca, almendra y caramelo duro) en vasos de plásticos de 150 ml y en orden aleatorio y se les solicitó ordenarlas por su grado de dureza (fuerza requerida para comprimir la muestra entre los molares) según la consigna de la **Figura 3-10**. Como neutralizante se utilizó agua mineral (marca Villa del Sur). Los evaluadores que fueron capaces de ordenar todas las muestras correctamente fueron seleccionados.

Nombre y Apellido:…….
Fecha: ……
Usted ha recibido cuatro alimentos: almendra, zanahoria, maní y caramelo duro para evaluar su grado de dureza. Colocar cada muestra entre los molares y muerda; evalué la fuerza requerida para comprimir la muestra.
Una vez evaluadas todas las muestras ordénalas en forma decreciente según el grado de dureza.

……. > ……. > …… > …….

Figura 3-10. Planilla utilizada en la prueba de ordenamiento de textura.

3.7.1.3. Entrenamiento de los evaluadores

Los candidatos que superaron las pruebas de selección con el mayor puntaje pasaron a la etapa de entrenamiento. Para esta etapa se utilizó la metodología descripta por Civille y Szczesniak (1973) y normalizadas por las normas IRAM 200013 que describe el método de Perfil de Textura. El entrenamiento de los evaluadores fue diseñado para familiarizar al individuo con los procedimientos de las pruebas o métodos sensoriales, aumentar su habilidad en detectar, identificar y describir los atributos texturales en los alimentos y desarrollar la

sensibilidad y memoria para que pudiera brindar mediciones sensoriales precisas, consistentes y reproducibles (Civille y Szczesniak, 1973).

El entrenamiento comenzó con un curso teórico para instruir a los evaluadores en los conceptos que se detallan a continuación: definición de textura, el método del Perfil de Textura utilizado para el entrenamiento y las evaluaciones y la clasificación de las características texturales (mecánicas, geométricas y otras características). En este último concepto se definieron los parámetros primarios y secundarios y los términos asociados. Se instruyó a los panelistas sobre el orden de aparición de las características texturales, durante la evaluación (visual, primera mordida, fase masticatoria temprana y tardía, deglución y sensación residual) (Szczesniak, 2002). Se presentaron las definiciones de los diferentes parámetros de textura desde el punto de vista sensorial e instrumental con el fin de reforzar la comprensión de los mismos y desarrollar un vocabulario común. Por último se presentó el método del Perfil de Textura instrumental para completar la información sobre las diferentes formas de evaluación de la textura.

En las primeras sesiones se les presentó a los evaluadores las diferentes escalas texturales utilizadas durante esta etapa con su definición sensorial y su técnica para evaluar las muestras. Se utilizó una escala semiestructurada con marcas de referencia cada un centímetro en todo el rango de la escala y debajo se colocó una escala no estructurada (de igual longitud a la anterior pero sin marcas de referencia) para habituar a los jueces con el procedimiento de marcado (**Figura 3-11**). El objetivo de esta etapa fue lograr que memoricen las posiciones de los alimentos de referencia y asocien la sensación percibida con el puntaje correspondiente en la escala. Fueron realizadas discusiones de mesa redonda para clarificar posibles diferencias entre los panelistas y para poder llegar a un consenso general (**Figura 3-12**).

Dureza

Definición física: Fuerza necesaria para obtener una dada deformación

Técnica:

Para sólidos: coloque la muestra entre los molares, muerda en forma uniforme y evalúe la fuerza requerida para comprimirla

Para semisólidos: coloque la muestra entre la lengua y el paladar y mida la fuerza requerida para comprimirla.

Entrenamiento: Evalúe los alimentos presentados en orden ascendente de dureza y ubíquelos en la escala inferior de acuerdo al valor indicado en cada uno. Repita estos pasos las veces que considere necesario hasta habituarse a reconocer las diferencias existentes entre los valores de referencia. Luego evalúe las muestras incógnitas.

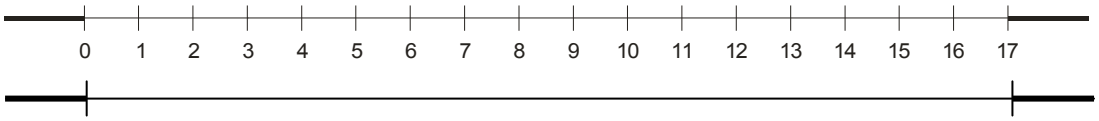


Figura 3-11. Planilla utilizada durante el entrenamiento para la escala de dureza.

Figura 3-12. Discusiones de mesa redonda.

La definición de cada atributo con su correspondiente escala utilizada durante el entrenamiento y para la evaluación de las muestras se detalla a continuación.

- *Escala de Dureza*

Definición sensorial: Fuerza requerida para comprimir una sustancia entre los molares (sólidos) o entre la lengua y el paladar (semisólidos).

Técnica para evaluar las muestras:

Sólidas: coloque la muestra entre los molares, muerda en forma uniforme y evalúe la fuerza requerida para comprimirla

Semisólidas: coloque la muestra entre la lengua y el paladar y mida la fuerza requerida para comprimirla.

Tabla 3-6. Escala de dureza.

Alimento (Tamaño, Temperatura)	Marca /Fabricante	Valor	Referencia
Queso crema (1 cm^3, 5-10ºC)	Casancrem–La Serenísima	1	Hough y col., (1994)
Clara de huevo (Hervida 5'; 0,75cm^3, ambiente)	-	2,5	
Salchicha (1 cm de espesor, ambiente)	Vienisima - Tres Cruces	5	
Aceituna rellena (1 unidad, ambiente)	Sin relleno - Nucete	6	
Maní (1 unidad, ambiente)	Sin sal - Kelloggs	9,5	
Chocolate (1cm^3, 10-15ºC)	Semiarmargo - Suchard	11	
Caramelo duro (1 unidad, ambiente)	Menthoplus - Arcor	17	

- *Escala de Fracturabilidad*

Definición sensorial: Fuerza con la cual una muestra se desmenuza, rompe o fractura.

Técnica: Coloque la muestra entre los molares y muerda en forma pareja hasta que la muestra se desmenuce, fracture o destruya; evaluando el grado en que la muestra se desgrana o fractura.

Tabla 3-7. Escala de fracturabilidad.

A7imento (Tamaño, Temperatura)	Marca /Fabricante	Valor	Referencia
Budín (1cm^3, ambiente)	Sin frutas - Bagley	1	Hough y col., (1994)
Tapita de alfajor (1cm^2, ambiente)	Fantoche	2,5	
Galletitas cracker (1cm^2, ambiente)	Criollitas - Bagley	5	
Galletitas dulces (1cm^2, ambiente)	Melitas - Bagley	8	
Tostadas (1cm^2, ambiente)	Minitost –Maxim S.A.	10	
Pastillas (1 unidad, ambiente)	DRF-Bonafide	12	
Caramelo duro (1 unidad, ambiente)	Menthoplus - Arcor	14,5	

- *Escala de Cohesividad*

Definición sensorial: grado en el cual una sustancia es comprimida entre los dientes antes de su ruptura.

Técnica: Coloque la muestra entre los molares, comprima y evalúe la cantidad de deformación alcanzada antes de la ruptura.

Tabla 3-8. Escala de cohesividad (modificada).

Alimento (Tamaño, Temperatura)	Marca /Fabricante	Valor	Referencia
Budín (1cm^3, ambiente)	Sin fruta - Bagley	1	Hough y col., (1994)
Queso semiduro (1cm^3, 5-10ºC)	Pategras - Sancor	5	
Caramelo masticable (1cm^3,ambiente)	Frutifru - Arcor	8	
Pasas de uva (1 unidad, ambiente)	Sultanita - Morena	8,2	
Gomita (1 unidad, ambiente)	Mogul - Arcor	11,5	
Caramelos masticables (1/2 unidad, ambiente)	Sugus - Suchard	12	
Chicle (1 unidad, ambiente)	Beldent-Staní	15	

- *Escala de Adhesividad al paladar*

Definición sensorial: Fuerza requerida para remover el material adherido al paladar, durante el proceso normal de ingestión.

Técnica: Coloque la muestra entre el paladar y la lengua, pegue la muestra en el paladar y evalúe la fuerza necesaria para remover el alimento del paladar.

Tabla 3-9. Escala de adhesividad al paladar (modificada).

Alimento (Tamaño, Temperatura)	Marca /Fabricante	Valor	Referencia
Margarina (1cm^3, 5-10ºC)	La Delicia - Molinos Río de la Plata	1	Hough y col., (1994)
Mermelada de durazno(1/2 cucharadita de té, ambiente)	Arcor	3	
Dulce de leche (1/2 cucharadita de té, 5-10ºC)	Repostero - La Serenisima	6	
Queso untable (1/2 cucharadita de té, 5-10ºC)	Tholem-Sancor	7,5	
Manteca de maní (1/2 cucharita de té, ambiente)	Skippy Smooth – Best Foods	12	

- *Escala de Crujencia*

Definición física: Sonido limpio, claro, rápido y agudo percibido durante la compresión de la muestra con los dientes.

Técnica: Coloque la muestra entre los incisivos manteniendo los labios abiertos, muerda y evalúe el nivel del sonido producido.

Tabla 3-10. Escala de crujencia (modificada).

Alimento (Tamaño, Temperatura)	Valor	Referencia
Banana ($1cm^3$, ambiente)	0	Chauvin y col., (2008)
Manzana Gala ($1cm^3$, ambiente)	4	
Manzana Granny Smith ($1cm^3$, ambiente)	7,5	
Papa ($1cm^3$, ambiente)	10	
Zanahoria ($1cm^3$, ambiente)	15	

- *Escala de Jugosidad*

Definición sensorial: Cantidad de fluido liberado durante las primeras tres mordidas.

Técnica: Coloque la muestra entre los molares, mastíquela tres veces y evalúe la cantidad de jugo liberado.

Tabla 3-11. Escala de jugosidad.

Alimento (Tamaño, Temperatura)	Valor	Referencia
Banana ($1cm^3$, ambiente)	0	Szczesniak y Ilker, (1988)
Zanahoria ($1cm^3$, ambiente)	1	
Hongos ($1cm^3$, ambiente)	2	
Arvejas (1 unidad, ambiente)	3	
Tomate ($1cm^3$, ambiente)	4	
Pepino ($1cm^3$, ambiente)	5	
Manzana (Granny Smith) ($1cm^3$, ambiente)	6	
Frutilla ($1cm^3$, ambiente)	7	
Melón (Rocío de miel) ($1cm^3$, ambiente)	8	
Naranja ($1cm^3$, ambiente)	9	
Sandia ($1cm^3$, ambiente)	10	

En esta sección, también se detallan las escalas de viscosidad, elasticidad y gomosidad que fueron únicamente utilizadas para evaluar la correlación instrumental-sensorial de algunos atributos texturales.

- *Escala de Elasticidad*

Definición sensorial: Velocidad la cual un producto vuelve a su forma original luego de haber sido comprimido entre los dientes.

Técnica:

Para semisólidos: coloque la muestra entre la lengua y el paladar y comprima parcialmente sin destruir la muestra, luego deje de ejercer la fuerza y evalué el grado y la rapidez con la cual la muestra recupera su forma.

Para sólidos: coloque la muestra entre los molares y comprima parcialmente sin destruir la muestra, luego deje de ejercer la fuerza y evalué el grado y la rapidez con la cual la muestra recupera su forma.

Tabla 3-12. Escala de elasticidad.

Alimento (Tamaño, Temperatura)	Marca /Fabricante	Valor	Referencia
Queso crema (1cm^3, 5-10ºC)	Casamcrem-La Serenísima	0	Hough y col., (1994)
Gomita (1unidad, ambiente)	Mogul - Arcor	5,2	
Relleno (1 unidad, ambiente)	Merengada - Bagley	6,5	
Gelatina [1] (1cm^3, 5-10ºC)	Exquisita - Molinos Río de la Plata	11	
Gelatina [2] (1cm^3, 5-10ºC)	Exquisita - Molinos Río de la Plata	15	

[1] 7 g de gelatina sin sabor + 85 g de gelatina de frutilla disueltos en 375ml de agua hirviendo.
[2] 85 g de gelatina sin sabor + 85 g de gelatina de frutilla disueltos en 375ml de agua hirviendo.

- *Escala de Viscosidad*

Definición sensorial: Fuerza requerida hecha con la lengua para verter un líquido de la cuchara a la boca.

Técnica: Remueva el liquido con la lengua de la cuchara y evalúe la fuerza ejercida.

Tabla 3-13. Escala de viscosidad (adaptada a alimentos argentinos).

Alimento (Tamaño, Temperatura)	Marca /Fabricante	Valor	Referencia
Agua (1/2 cucharadita de té, ambiente)	Villa del Sur	1	Szczesniak y col., (1963)
Crema liviana (1/2 cucharadita de té, 5-10ºC)	Sancor	2	
Crema pesada (1/2 cucharadita de té, 5-10ºC)	Sancor	3	
Salsa de chocolate (1/2 cucharidita de té, 5-10ºC)	La Parmesana	6	
Mezcla: 1/2 taza de mayonesa + 2 cucharadas de crema pesada (1/2 cucharadita de té, 5-10ºC)	Hellman´s + Sancor	7	
Leche condensada (1/2 cucharadita de té, 5-10ºC)	La lechera - Nestle	8	

- *Escala de Gomosidad*

Definición sensorial**:** Densidad percibida a través de la masticación; energía requerida para desintegrar un alimento semisólido a un estado listo para ser tragado.

Técnica: Coloque el alimento en la boca y manipúlelo con la lengua contra el paladar y evalué la cantidad de manipulación necesaria antes de que el alimento se desintegre.

Tabla 3-14. Escala de gomosidad (adaptada a alimentos argentinos).

Alimento (Tamaño, Temperatura)	Marca /Fabricante	Valor	Referencia
40% pasta de harina (1 cucharadita de té, ambiente)	Favorita - Molinos Río de la Plata	1	Szczesniak y col., (1963)
45% pasta de harina (1 cucharadita de té, ambiente)		2	
50% pasta de harina (1 cucharadita de té, ambiente)		3	
55% pasta de harina (1 cucharadita de té, ambiente)		4	
60% pasta de harina (1 cucharadita de té, ambiente)		5	

Finalizada la etapa de entrenamiento se evaluaron muestras de referencia y muestras incógnita para testear a los panelistas. Esta etapa del entrenamiento se realizó en cabinas individuales de evaluación sensorial. Los alimentos de referencia se presentaron en vasos plásticos de color blanco de 150 ml con su valor correspondiente impreso en el frente de los mismos. Las muestras a evaluar se presentaron en vasos plásticos de color blanco de 150 ml codificadas con números de tres dígitos al azar. Se utilizó agua mineral para el enjuague de la boca y galletitas sin sal como neutralizante. Se utilizaron escalas semiestructuradas con tres anclas. Se presentaron todas las muestras de referencia y además muestras incógnitas para evaluación con el objetivo de que los panelistas ubicaran correctamente las posiciones de las referencias y pudieran relacionar la ubicación de las muestras evaluadas con dichas referencias. También se realizaron ejercicios en los cuales los panelistas debían ordenar las muestras de referencia en orden creciente de la propiedad correspondiente.

El entrenamiento y evaluación de patrones de referencia de escala se alternó con la evaluación de muestras similares a las que luego se medirían con el propósito de familiarizar al panel con las características de las muestras a medir y también se midieron otros alimentos para monitorear el uso de las escalas. Para la evaluación de las muestras incógnita se utilizaron escalas semiestructuradas con tres anclas y los alimentos correspondientes a las anclas como referencia. Con los resultados obtenidos de las muestras incógnitas se aplicó un análisis de

varianza de dos factores (muestra-sujeto). Se estudiaron las diferencias entre sujetos con el objetivo de verificar que los mismos evaluaron como grupo.

Una vez finalizada la etapa de entrenamiento en las escalas de textura se evaluó la textura oral de los tejidos de manzana y pera con los distintos tratamientos aplicados. Las evaluaciones se realizaron en cabinas individuales (**Figura 3-13**). Las muestras se presentaron por duplicado en orden aleatorio en vasos plásticos de 150 ml codificados al azar y se utilizaron escalas semiestructuradas con anclas acompañadas de los alimentos de referencia correspondientes a dichas anclas. En la **Tabla 3-15** se detalla los alimentos utilizados como anclas para cada escala durante la evaluación de las muestras.

Tabla 3-15. Alimentos utilizados como anclas de referencia para las escalas texturales en la evaluación sensorial.

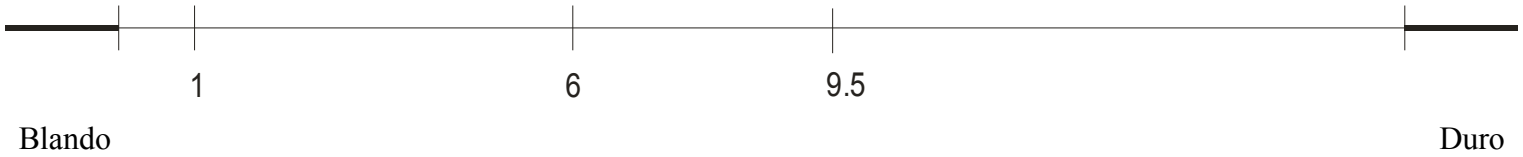
Escala	Ancla inferior	Ancla media	Ancla superior
Dureza	1 (Queso crema)	6 (Aceituna)	9,5 (Maní)
Fracturabilidad	2,5 (Tapita de alfajor)	5 (G. Criollita)	8 (G. Melita)
Cohesividad	5 (Queso semiduro)	8 (Masticable Frutifru)	15 (Chicle)
Adhesividad	1 (Margarina)	6 (Dulce de leche)	12 (Manteca de maní)
Crujencia	4 (Manzana Gala)	7,5 (Manzana Granny Smith)	15 (Zanahoria)
Jugosidad	4 (Tomate)	6 (Manzana)	9 (Naranja)

Todas las mediciones se realizaron sobre el mismo lote de fruta. Como neutralizante se utilizó agua mineral. Se midieron tres muestras por sesión y para cada muestra se evaluaron las propiedades de dureza, fracturabilidad, cohesividad, adhesividad, crujencia y jugosidad. En la **Figura 3-14** se detallan las planillas presentadas a los jueces para la medición de las muestras. Cada juez debía indicar con una marca sobre la escala el lugar que adjudicaba a la muestra. Luego se midió la distancia desde el origen de la escala para obtener el valor asignado. Se agregaron descriptores en los extremos de cada escala y se enumeraron todos los alimentos de referencia para ayudar a la memoria de los evaluadores.

Figura 3-13. Área de evaluación.

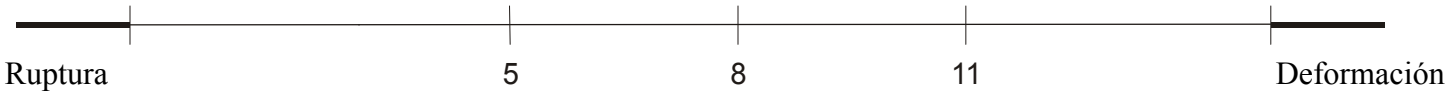
Escala de Dureza

Definición física: fuerza necesaria para obtener una dada deformación.
Definición sensorial: fuerza requerida para comprimir una sustancia entre los molares (sólidos) o entre la lengua y el paladar (semisólidos).
Técnica:
para sólidos: coloque la muestra entre los molares, muerda en forma uniforme y evalúe la fuerza requerida para comprimirla.
para semisólidos: coloque la muestra entre la lengua y el paladar y mida la fuerza requerida para comprimirla.
Evaluación: evalúe las anclas presentadas y luego las muestras codificadas de izquierda a derecha. Evalúe la muestra, indique con un solo trazo sobre la escala el valor que considera que mejor describe a la muestra. Repita estos pasos las veces que considere necesario.
Referencias: 1) Queso crema, 2,5) Clara de huevo, 5) Salchicha, 6) Aceituna, 9,5) Maní, 11) Chocolate, 17) Caramelo duro



Escala de Cohesividad

Definición física: grado en el cual un material puede ser deformado antes de su ruptura.
Definición sensorial: grado en el cual una sustancia es comprimida entre los dientes antes de su ruptura.
Técnica: coloque la muestra entre los molares, comprima y evalúe la cantidad de deformación alcanzada antes de la ruptura.
Evaluación: evalúe las anclas presentadas y luego las muestras codificadas de izquierda a derecha. La cantidad de muestra a utilizar es un copo. Indique con un solo trazo sobre la escala el valor que considera que mejor describe a la muestra. Repita estos pasos las veces que considere necesario.
Referencias: 1) Budín, 5) Queso holanda, 8) Caramelo frutifru, 11) Gomita mogul, 12) Caramelo sugus, 15) Chicle



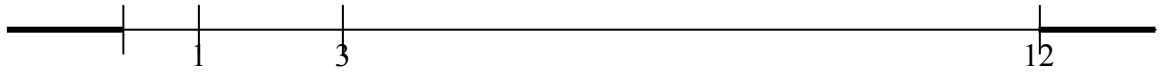
Escala de Fracturabilidad

Definición física: fuerza con la cual un material se fractura. Un producto con alto grado de dureza y bajo grado de cohesividad.
Definición sensorial: grado en el cual una muestra se desmenuza, rompe o fractura.
Técnica: coloque la muestra entre los molares y muerda en forma pareja hasta que la muestra se desmenuce, fracture o destruya; evaluando la fuerza con la cual el alimento se separa de los dientes.
Entrenamiento: evalúe las anclas presentadas y luego las muestras codificadas de izquierda a derecha, indique con un solo trazo sobre la escala el valor que considera que mejor describe a la muestra. Repita estos pasos las veces que considere necesario.
Referencias: 1) Budín, 2,5) Tapita de alfajor, 5) Criollitas, 8) Melitas, 10) Tostada, 12) DRF, 14.5) Caramelo duro

Desmenuzable Fracturable

Escala de Adhesividad al paladar

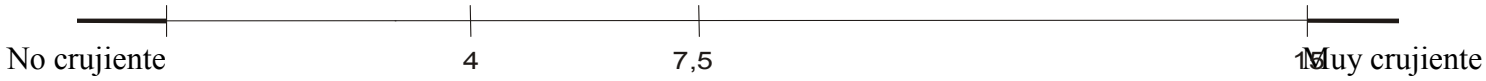
Definición física: trabajo necesario para vencer las fuerzas atractivas entre la superficie del alimento y la de otro material con el que haya entrado en contacto.
Definición sensorial: fuerza requerida para remover el material adherido al paladar, durante el proceso normal de ingestión.
Técnica: pegue si es posible el alimento en el paladar empujándolo con la lengua y evalúe la fuerza necesaria para remover con la lengua.
Entrenamiento: evalúe las anclas presentadas y luego las muestras codificadas de izquierda a derecha, indique con un solo trazo sobre la escala el valor que considera que mejor describe a la muestra. Repita estos pasos las veces que considere necesario.
Referencias: 1) Margarina, 3) Mermelada, 6,5) Dulce de leche, 8) Queso, 12) Mantequilla



No adhesivo Muy adhesivo

Escala de Crujencia

Definición física: Sonido limpio, claro, rápido y agudo percibido durante la compresión de la muestra.
Definición física: Sonido limpio, claro, rápido y agudo percibido durante la compresión de la muestra con los dientes incisivos.
Técnica: Coloque la muestra entre los incisivos manteniendo los labios abiertos, muerda y evalúe el nivel del sonido producido.
Entrenamiento: Evalúe las anclas presentadas y luego las muestras codificadas de izquierda a derecha, indique con un solo trazo sobre la escala el valor que considera que mejor describe a la muestra. Repita estos pasos las veces que considere necesario.
Referencias: 0) Banana, 4) Manzana Gala, 7,5) Manzana Granny Smith, 10) Papa, 15) Zanahoria



Escala de Jugosidad

Definición física y sensorial: Cantidad de fluido liberado durante las primeras tres mordidas.
Técnica: Coloque la muestra entre los molares, mastíquela tres veces y evalúe la cantidad de jugo liberado.
Entrenamiento: Evalúe las anclas presentadas y luego las muestras codificadas de izquierda a derecha, indique con un solo trazo sobre la escala el valor que considera que mejor describe a la muestra. Repita estos pasos las veces que considere necesario.
Escala: 0) Banana, 1) Zanahoria, 2) Hongos, 4) Tomate, 5) Pepino, 6) Manzana, 7) Frutilla, 8) Melón (rocío de miel), 9) Naranja, 10) Sandia.

Figura 3-14. Planillas de las escalas utilizadas en las evaluaciones.

3.7.2. Evaluación con consumidores

Se utilizó una prueba de diferencia contra control (Meilgaard y col., 2006) para verificar si los consumidores (48) encontraban diferencia entre las muestras escaldadas 90 s (E), osmotizadas (DOA), y osmotizadas con escaldado previo (E+DOA). También se evaluó el mismo sistema con la incorporación de lactato de calcio durante la deshidratación osmótica. En cada sesión los consumidores recibieron tres vasos de plásticos de color rojo (dos muestras a evaluar y un control camuflado) con tres muestras de 1 cm^3 cada uno y un vaso identificado como control. Los vasos fueron codificados con números de tres dígitos elegidos al azar y aleatorizados. Como neutralizante se utilizó agua mineral y las muestras fueron servidas a la temperatura de consumo (4-5ºC). Se les pedía a los consumidores que evaluaran la magnitud de la diferencia global entre cada muestra y el control reconocido como tal y que lo marcaran en una escala numérica de categorías desde "ninguna diferencia" a "muy diferente" (**Figura 3-15**).

Con los resultados obtenidos se aplicó un análisis de varianza de dos factores (muestra-sujeto). Se estudiaron las diferencias entre sujetos con el objetivo de verificar que los mismos evaluaron como grupo. En caso de encontrarse diferencias entre las muestras se aplicara la minima diferencia significativa de Dunnet para encontrar las diferencias entre las muestras y el control.

PRUEBA DE DIFERENCIA CON UN CONTROL

Nombre…… **Fecha: …/…/…** **Evaluador Nº……**

Instrucciones

1) Usted recibirá 4 muestras, una codificada como K (control) y el resto con 3 dígitos.
2) Pruebe la muestra control (K). Eválue su textura.
3) Pruebe la muestra problema (codificada con tres dígitos) y mida la diferencia textural respecto de la muestra control (K) realizando una marca (X) en la opción que mejor refleje su opinión.
4) Repita este procedimiento para cada muestra problema.
5) Las muestras se deben evaluar de izquierda a derecha.

Muestra Nº……..	**Muestra Nº……**	**Muestra Nº……..**	
……	……	……	Sin diferencia
……	……	……	Muy escasa diferencia
……	……	……	Escasa/moderada diferencia
……	……	……	Moderada diferencia
……	……	……	Moderada/Gran diferencia
……	……	……	Gran diferencia
……	……	……	Extremada diferencia

Recuerde que a veces puede haber una o mas muestras iguales al control.

Figura 3-15. Planilla utilizada en la prueba de diferencia contra control.

3.8. Medición de las propiedades reológicas

3.8.1. Mediciones a bajas deformaciones

Las propiedades viescoelásticas lineales de las muestras fueron determinadas a 25ºC en un Reómetro Dinámico Paar Physica CR 300 (Antón Paar GMBH, Alemania) (**Figura 3-16**). Para la medición se usó la geometría de platos paralelos de 3 cm de diámetro (sensor PP30 con superficie rugosa). El plato inferior del equipo ó platina (TEK 150P-CF) poseía un controlador de temperatura, conectado a un baño termostático (Viscotherm VT2, Physica, Alemania). El calentamiento de este baño se hacía con un sistema Peltier que permitía obtener altas velocidades de calentamiento y de enfriamiento.

Se realizaron ensayos oscilatorios (barrido de amplitud y barrido de frecuencia) y ensayos rotatorios (ensayo de fluencia – recuperación). Se utilizaron 10 replicados para los barridos de frecuencia y 15 replicados para los ensayos de fluencia-recuperación.

Las muestras fueron colocadas entre la platina y el sensor de medida, utilizándose una fuerza de compresión igual a 1N durante 150 segundos antes de los ensayos oscilatorios y rotatorios para proveer una mayor área de contacto entre la muestra y el sensor; y minimizar posibles deslizamientos de la muestra durante los ensayos. Dicha fuerza se mantuvo constante durante el transcurso de los ensayos oscilatorios.

Figura 3-16. Reómetro Dinámico Paar Physica CR 300 (Antón Paar GMBH, Alemania).

3.8.1.1. Ensayos oscilatorios

Los ensayos oscilatorios fueron realizados para obtener los valores experimentales del módulo de almacenamiento (G´), el módulo de pérdida (G´´) y el factor de pérdida (tan $\delta = G'' / G'$).

Primero se determinó el rango viscoelástico lineal (RVL) con un barrido de amplitud con control de la deformación de cizalla (BA CDC). Se fijó la frecuencia angular en 10 s^{-1}, barriendo la amplitud de deformación entre 0,001 y 10 %. El valor del RVL fue determinado utilizando el software del equipo (Paar Physica US 200). El software calcula el RVL detectando mediante un punto de inflexión la caída de la pendiente de la curva módulo elástico (G´) vs. deformación (γ). El software determina el valor límite del RVL y un valor inferior al mismo como el recomendado para ser utilizado luego en el ensayo de barrido de frecuencias.

Finalmente dentro del rango viscoelástico lineal se realizó un barrido de frecuencia para determinar los espectros mecánicos (G' y G" vs frecuencia). Se utilizó un rango de frecuencia angular entre 0,1 y 100 s^{-1}.

Los valores del módulo elástico en función de la frecuencia fueron modelados a través de una regresión logarítmica:

$$\log (G') = n \log (\omega) + k \qquad \textbf{(3-4)}$$

Donde: **n** es la pendiente de la regresión, y **k** es la ordenada al origen.

3.8.1.2. Ensayos rotatorios

Los ensayos de fluencia – recuperación fueron realizados aplicando un esfuerzo de cizalla constante (τ) igual a 35 Pa durante 100 segundos, con un periodo de recuperación de 200 segundos. Se registró el porcentaje de deformación (γ %) que sufría la muestra en ambos periodos, y además se calculó la capacitancia (J = % γ /τ) en función del tiempo.

Para asegurarse que durante el ensayo de fluencia-recuperación se estuviera trabajando dentro de la región viscoelástica lineal, se realizó un barrido de amplitud con control del esfuerzo de cizalla (CEC) en las muestras con diferentes tratamientos. A partir de estos ensayos se decidió utilizar un esfuerzo de cizalla de 35 Pa para asegurarse de que todas las muestras se encontraran dentro del RVL.

Previamente al ensayo de fluencia, las muestras fueron sujetas a repetidos ciclos de esfuerzo y relajación para destruir la memoria lejana del material en estudio, remover cualquier irregularidad y obtener resultados reproducibles.

Las curvas de capacitancia fueron modeladas con un modelo de Kelvin Voigt generalizado de 6 elementos. El mismo consiste en un resorte conectado en serie con dos elementos de Kelvin-Voigt (cada uno de los elementos de Kelvin-Voigt tiene un resorte y un pistón conectados en paralelo) y con un pistón (Sherman, 1970). En la **Figura 3-17** se muestra el esquema del modelo utilizado. La ecuación correspondiente es:

$$J(t,\tau) = (J_0) + \sum_{i=1}^{2} (J_i)\left(1 - e^{-t/\lambda_i}\right) + t/\eta_N \qquad \textbf{(3-5)}$$

Donde: J (t, τ) es la capacitancia (= γ(t) / τ con γ(t) la deformación al tiempo t y τ el esfuerzo constante aplicado); J_o es la capacitancia instantánea a t=0; J_i son las capacitancias de retardo**;** $\boldsymbol{\lambda_i}$ (= η_i x J_i) son los tiempos de retardo y η_i son los coeficientes de viscosidad asociados con los elementos de Kelvin-Voigt; y η_N es el coeficiente de viscosidad

asociado con el fluido Newtoniano inversamente proporcional a la fluidez del material en estado estacionario.

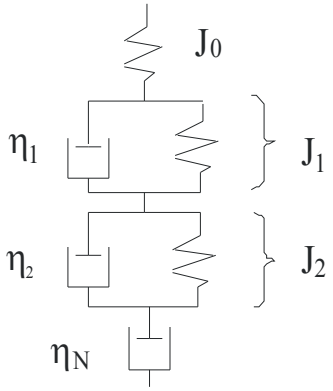


Figura 3-17. Esquema del modelo de Kelvin Voigt generalizado constituido por 6 elementos.

Las regresiones no lineales para el modelado de las curvas de fluencia se realizaron utilizando el programa Origin Pro versión 8.0 (OriginLab Corporation, Northampton, EEUU). Los valores iniciales que deberían fijarse para que el programa comenzara la iteración fueron obtenidos utilizando el software US200, el cual tiene incorporado el modelado de la curva de fluencia para el modelo de Kelvin Voigt generalizado con un elemento de Kelvin-Voigt.

Las determinaciones de viscosidad para las muestras de referencia de la escala sensorial de viscosidad se realizaron a 24ºC. Los ensayos fueron realizados usando un sensor cono/plato (CP 25-2) con un gap de 0,00005m y el barrido de velocidad de cizalla fue realizado de 0 a 110 rpm. Se midieron cinco réplicas por muestra y los resultados utilizados para la correlación con su correspondiente puntaje sensorial fueron los obtenidos para 110 rpm según las recomendaciones de Szczesniak y col. (1963).

3.8.2. Mediciones a altas deformaciones. Análisis del Perfil de Textura instrumental

Las determinaciones a altas deformaciones fueron realizadas mediante el análisis del perfil de textura a 25ºC utilizando una máquina universal Instron modelo 3345 (Massachusetts, EEUU) (**Figura 3-18**). Para la obtención de las curvas fuerza- tiempo (**Figura 3-19**) se utilizó una velocidad de desplazamiento constante de 60 mm/min, un

valor de compresión del 70% y una celda de carga de 5000 N. Se realizaron 20 mediciones para cada condición. Los parámetros a medir a través de este método fueron calculados usando las definiciones formuladas por Bourne (1978) detalladas en la **Tabla 3-16**.

También se determinó el modulo de deformabilidad (E_d) calculado a través de la ecuaciones propuestas por Calzada y Peleg (1978) detalladas a continuación. Los datos de las curvas fuerza-tiempo fueron transformados en valores de esfuerzo real (σ_R) vs. deformación real (ε_R).

$$E_d = \sigma_R / \varepsilon_R \qquad \textbf{(3-6)}$$

Si el volumen permanece constante σ_R puede expresarse como:

$$\sigma_R = \frac{F(t)\left[H_0 - \Delta H(t)\right]}{A_0 H_0} \qquad \textbf{(3-7)}$$

$$\varepsilon_R = \ln\left(\frac{H_0}{H_0 - \Delta H}\right) \qquad \textbf{(3-8)}$$

donde: σ_R es el esfuerzo real (N/m^2), F(t) es la fuerza a tiempo t (N), H_0 es la altura inicial del espécimen (m), ΔH es la disminución absoluta de la altura inicial del espécimen en la dirección de la fuerza aplicada (m), A_0 es el área inicial de la muestra (m^2) y ε_R es la deformación real definida por Hencky.

Para el cálculo de la pendiente (E_d), porción lineal de la curva, se utilizaron los datos de la curva transformada en el rango del 10-20% de deformación real.

Figura 3-18. Máquina universal Instron modelo 3345 (EEUU).

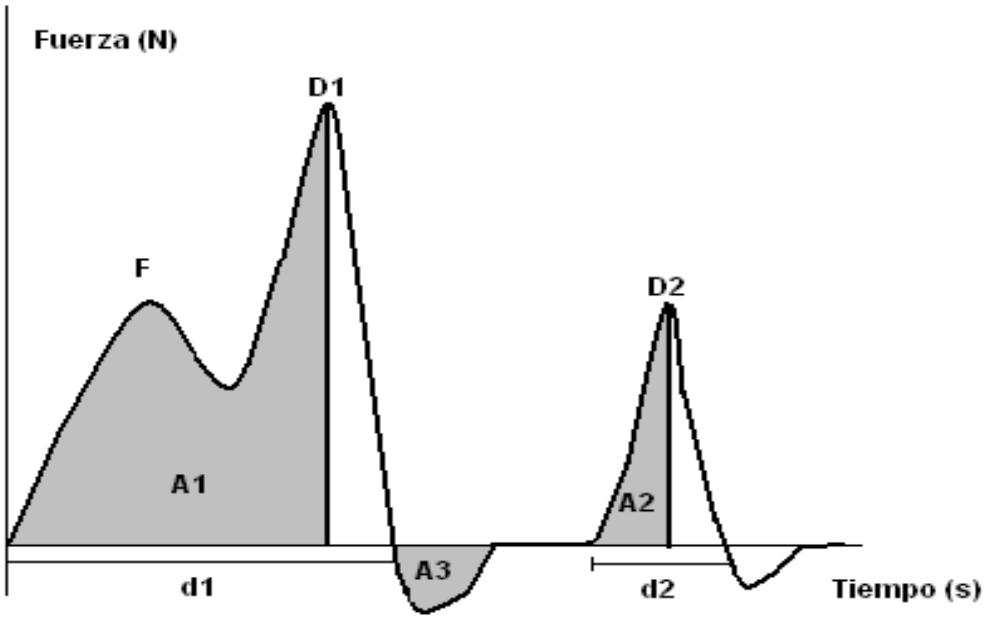


Figura 3-19. Curva típica del Análisis del Perfil de Textura.

Tabla 3-16. Definiciones instrumentales usadas para determinar los parámetros característicos del análisis del perfil de textura.

Parámetro	Definición instrumental (unidades)
Fracturabilidad (F)	Primer pico significativo de fuerza durante el primer ciclo de compresión. Cuando este pico no se manifiesta la fracturabilidad coincide con la dureza (Bourne y Comstock, 1981) (N).
Dureza 1 (D_1)	Fuerza máxima registrada durante el primer ciclo de compresión (N).
Dureza 2 (D_2)	Fuerza máxima registrada durante el segundo ciclo de compresión (N).
Área 1 (A_1)	Área bajo la curva del primer ciclo de compresión hasta el pico máximo (J).
Área 2 (A_2)	Área bajo la curva del segundo ciclo de compresión hasta el pico máximo (J).
Cohesividad (A_2/A_1)	Relación entre el área 2 y área 1.
Elasticidad (d_2/d_1)	Altura que la muestra recupera durante el tiempo que transcurre entre el final de la primera compresión y el comienzo de la segunda compresión. Estandarizada con la distancia inicial de la probeta.
Adhesividad (A_3)	Área negativa bajo la curva del primer ciclo de compresión generada por el trabajo que realiza la prensa para despegarse de la muestra (J).
Gomosidad (D_1*A_2/A_1)	Producto entre dureza 1 y cohesividad (N).
Masticabilidad ($D_1*A_2/A_1*d_2/d_1$)	Producto entre gomosidad y elasticidad (N).

3.9. Técnicas microscópicas

3.9.1. Microscopía óptica

Las muestras se cortaron en rectángulos (≈ 2mm x 4 mm y 4 mm de espesor) con una hoja de afeitar identificando con una marca, en el caso de las muestras irradiadas, la superficie tratada. Los rectángulos de tejido fueron fijados en una solución 3 % p/p de glutaraldehído preparada en buffer 20 mM de fosfato de potasio (pH 7,4) durante doce horas a 4-5ºC. Luego fueron lavados con solución buffer 0,1 M de fosfato de potasio (pH 7,4) y fijadas en una solución acuosa 1,5 % p/p de OsO_4 durante dos horas a 20ºC (D'Ambrogio de Argüeso, 1986). Posteriormente fueron deshidratadas en una serie de

soluciones sucesivas de concentración ascendente de acetona y embebidas en una resina Spurr de baja viscosidad.

De las muestras incluidas en la resina se cortaron secciones ultrafinas de 1μm de espesor con una cuchilla de vidrio utilizando un micrótomo Sorval MT2B Ultracut (USA). Las secciones fueron teñidas con azul de toluidina y examinadas en un microscopio Carl Zeiss Axioskop 2 Plus (Zeiss, Oberkochen, Alemania). Los reactivos utilizados para preparar las muestras eran de grado analítico (Merck Química Argentina S.A, Argentina).

3.9.2. Microscopía electrónica de trasmisión

A partir de las muestras embebidas en resina Spurr se cortaron secciones ultrafinas de 1μm con una cuchilla de vidrio utilizando un micrótomo Sorval MT2B Ultracut (USA) y se montaron sobre grillas de cobre. Luego fueron coloreadas con una solución 5 % p/p de acetato de uranilo por 45 minutos y después con citrato de sodio y nitrato de plomo (Reynolds, 1963) y examinadas con un microscopio JEOL modelo JEM-1200 ExII (Japón) a 80 kv. Los reactivos utilizados para preparar las muestras eran de grado analítico (Merck Quimica Argentina S.A, Argentina).

3.10. Análisis estadístico

Los resultados fueron expresados como la media ± la desviación estándar y fueron sujetos a diferentes análisis utilizando el software Infostat v.2009 (Universidad Nacional de Córdoba, Argentina).

Se evaluaron diferentes modelos de regresión no lineal para determinar las relaciones instrumentales-sensoriales de algunos atributos de textura. Los modelos fueron validados internamente a través de un análisis de varianza (ANOVA), el coeficiente de determinación y el test de Fisher; y externamente con el test de Student entre el valor observado y el predicho por el modelo.

Los puntos experimentales de las curvas de G' fueron transformados utilizando logaritmo, luego se ajustaron a una regresión lineal para describir el comportamiento de cada curva debido a su simplicidad y porque el ajuste se adecuaba perfectamente. Posteriormente se analizó la significación entre la curvas utilizando el método reportado por Costell y Duran (1978). En este último se evalúa la significación de la diferencia entre la regresión conjunta del control con cada tratamiento y la suma de las regresiones para el control y las tratadas por separado, mediante el test de Fisher.

Los resultados de las mediciones de las propiedades reológicas (parámetros de las curvas de fluencia y parámetros del análisis del perfil de textura) fueron analizados mediante un análisis de varianza multivariado (MANOVA) para buscar las diferencias entre las muestras. Se aplicó un test de Hotelling corregido por Bonferroni (con un nivel de confianza del 95 %) cuando se encontraron diferencias significativas. Para realizar el MANOVA se verificaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad y se analizaron posibles outliers con la distancia de Mahalanobis ($p \leq 0{,}001$). Se realizó análisis de componentes principales (PCA) para explicar la relación entre las variables y las muestras.

Los resultados obtenidos por el panel entrenado y por los consumidores fueron analizados con un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores (muestra-sujeto). Se analizó si existían diferencias entre los evaluadores con el objetivo de verificar el nivel de entrenamiento del panel y la consistencia de las evaluaciones. Se aplicó un test de Tukey (con un nivel de confianza del 95%) cuando se encontraron diferencias significativas en el factor muestras. Previamente se verificaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad

Se utilizó un análisis de regresión de cuadrados mínimos parciales (Partial Least Squares, PLS) para estudiar la relación entre las propiedades reológicas (bloque X) y la textura (bloque Y) (Martens y Martens, 1986). Este análisis es particularmente útil cuando se desea predecir un conjunto de variables dependientes (Y) desde un conjunto (relativamente grande y posiblemente correlacionadas) de variables predictoras (X). El objetivo del método PLS es describir Y a partir de X y su estructura de variación común. PLS se usa cuando existe correlación entre las variables predictoras y/o existen más predictoras que observaciones. Ambos bloques fueron estandarizados antes del análisis. Este método fue realizado con el paquete estadístico GenStat (GenStat discovery edition 3, Oxford, UK).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Metodología de selección y entrenamiento para obtener un panel entrenado

Para formar el panel entrenado se reclutó un grupo de 18 personas del Departamento de Industrias de la Universidad de Buenos Aires a través de una encuesta personal (ver **Materiales y Métodos, sección 3.7.1.2 a**). Analizando los diferentes puntos de la encuesta (datos personales, disponibilidad, salud, hábitos alimentarios y preguntas de textura) se determinó si podían participar de la etapa de selección. Solo un candidato no pudo participar por presentar problemas odontológicos, pudiendo este hecho distorsionar o variar la percepción de muchos atributos de textura.

4.1.1. Etapa de selección

4.1.1.1. Reconocimiento de gustos básicos

Los 17 candidatos seleccionados a partir de la encuesta inicial fueron sometidos a pruebas de reconocimiento de gustos básicos mediante la prueba de Jellinek (ver **Materiales y Métodos, sección 3.7.1.2 b**). En la **Tabla 4-1** se detallan los resultados obtenidos.

Los candidatos 11, 14, 17 y 18 no fueron seleccionados para las siguientes pruebas debido a que no superaron el 60% de aciertos en ambas series evaluadas.

4.1.1.2. Prueba del triángulo secuencial

El objetivo de esta prueba fue evaluar la sensibilidad de los evaluadores para detectar pequeñas diferencias en pares de alimentos muy similares. De acuerdo a lo descripto en **Materiales y Métodos, sección 3.7.1.2 c**, se determinó el puntaje de cada candidato según la cantidad de triángulos aceptados y se los computó en el gráfico de aceptación o rechazo. En la **Figura 4-1** se puede observar que los candidatos 3, 4, 12 y 13 cayeron en la zona de rechazo, por lo tanto no fueron considerados para las etapas siguientes.

Tabla 4-1. Porcentaje de acierto de la prueba de Jellinek.

% de aciertos Prueba Jellinek		
Candidato	Serie geométrica	Serie aritmética
1	70	50
2	50	100
3	70	90
4	80	90
5	70	90
6	90	70
7	90	100
8	90	60
9	80	90
10	60	60
11	**50**	**40**
12	70	60
13	80	90
14	**40**	**40**
15	70	70
16	70	80
17	**40**	**50**
18	**30**	**40**

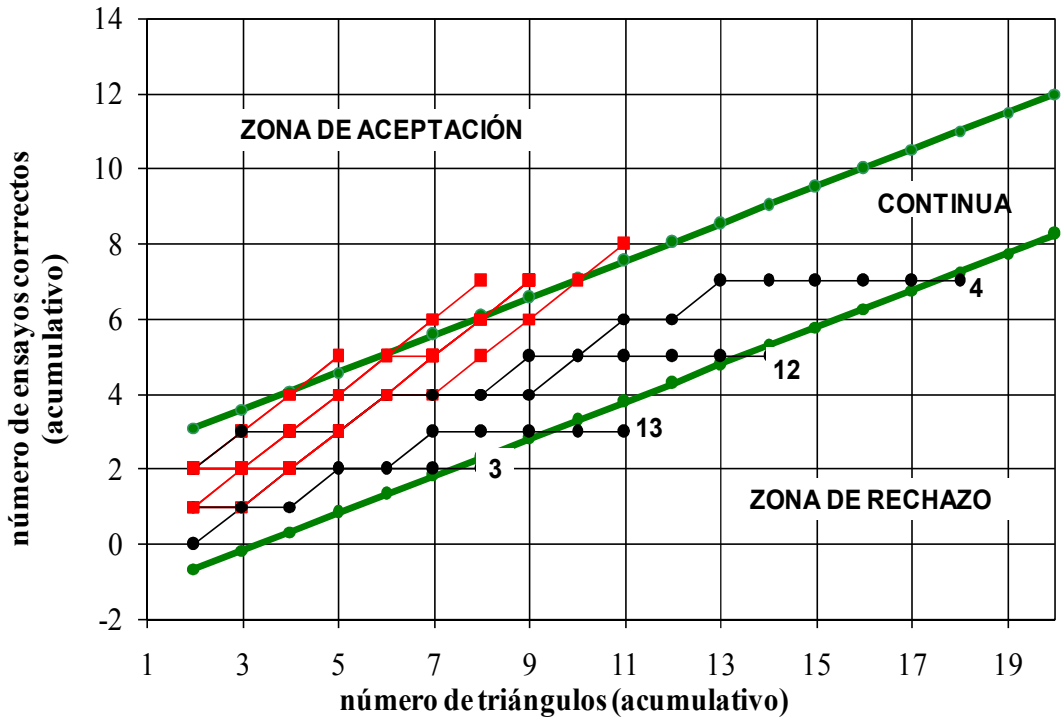


Figura 4-1. Gráfico de aceptación/rechazo obtenido mediante el ensayo del triángulo secuencial.

4.1.1.3. Reconocimiento fisiológico de textura

Como prueba final de selección se realizó la prueba ordenamiento de textura según fue descripta en la sección **Materiales y Métodos, sección 3.7.1.2 d**. Casi todos los evaluadores pudieron identificar el atributo "dureza" y ordenar las muestras con el siguiente orden: caramelo duro, almendra, zanahoria y maní. Solo un candidato no ordenó las muestras correctamente.

Finalizando la etapa de selección y evaluando los resultados de las diferentes pruebas nueve evaluadores (6 mujeres y 3 hombres) fueron seleccionados para la etapa de entrenamiento.

4.1.2. Etapa de entrenamiento

Con el curso teórico los panelistas incorporaron los conceptos básicos de textura y la forma en que estos se ponen de manifiesto durante la masticación de un alimento. Mediante el mismo, se logró la comprensión de las definiciones de las propiedades texturales que iban a medir y las técnicas de medición.

La etapa de entrenamiento se realizó en sesiones semanales de una hora durante nueve meses. En las sesiones de mesa redonda se realizó el reconocimiento de las escalas de referencia para los atributos dureza, fracturabilidad, cohesividad, adhesividad al paladar, crujencia y jugosidad descriptas en **Materiales y Métodos, sección 3.7.1.3**. En esta etapa los panelistas lograron reconocer y medir cada atributo de textura en los alimentos presentados y su variación en la escala correspondiente.

Algunas muestras de referencia de las escalas de adhesividad al paladar, cohesividad y crujencia fueron reemplazadas por otra marca o tipo por no encontrarse disponibles en el mercado local, siguiendo las recomendaciones de Bourne (1982) acerca de utilizar alimentos de marcas reconocidas, de fácil preparación y que no presentaran variaciones con la temperatura o con las condiciones de almacenamiento.

Además, se detectó y resolvió el uso incorrecto de una muestra de referencia, la cual se describe a continuación. En la escala de cohesividad, los evaluadores encontraron que la muestra de referencia *pasa de uva* que representaba un valor de 10 en la escala presentó un valor cercano a 8. Considerando que para esta muestra se tuvo que utilizar otra marca diferente a la recomendada por no encontrarse en el mercado, se decidió continuar con el entrenamiento sin considerar esta referencia. Paralelamente y como parte del

entrenamiento, el panel midió muestras de gomita frutal (marca Mogul-Arcor) obteniéndose un valor promedio de 11,5 en la escala de cohesividad. Este resultado coincidió con el valor publicado por Hough y col. (1994) para esta misma muestra. Por lo tanto, se decidió utilizar esta muestra como referencia debido a que se obtuvieron resultados reproducibles y acordes a lo reportado en bibliografía.

Al evaluar la propiedad de adhesividad al paladar los jueces coincidieron en que la manzana y la pera presentaban un valor muy bajo o prácticamente despreciable. Luego de discutirlo en mesa redonda se decidió considerar que las muestras no poseen dicha propiedad textural.

Finalizada la etapa de reconocimiento en mesa redonda se pasó a trabajar en cabinas individuales de evaluación sensorial. En esta etapa se midieron muestras de manzana y pera y otros alimentos. En la **Tabla 4-2** se detallan los resultados obtenidos de los alimentos evaluados para cada escala utilizada durante el entrenamiento. Estos alimentos fueron seleccionados teniendo en cuenta que su característica textural predominante fuera la que se iba a evaluar. Evaluando los resultados obtenidos los jueces fueron capaces de emitir juicios en forma homogénea indicando que el panel ya estaba capacitado para evaluar las muestras problema.

4.1.3. Calibración del panel

Durante la etapa de evaluación de las muestras de manzana y pera se realizaron periódicamente sesiones en mesa redonda (de una hora de duración) con el objeto de mantener el adecuado nivel de entrenamiento del panel. En cada sesión, se presentaron todos los alimentos de referencia correspondientes a las escalas utilizadas con su correspondiente valor indicado en la planilla de especificación y en el recipiente contenedor. Además se les dieron las correspondientes escalas para marcar la posición de cada muestra. De esta manera se pudo recordar la asociación de la sensación percibida con el puntaje asignado en la escala. Además, se discutieron las dudas puntuales y dificultades que pudieran haber surgido y las mismas se resolvieron por consenso para lograr un criterio constante en la evaluación de las muestras.

Tabla 4-2. Alimentos evaluados durante el entrenamiento.

Alimento	Tipo/Marca	Promedio± DS	Fisher
Dureza			
Manzana fresca (1cm^3)	Granny Smith	6,4 ± 1,24	0,74
Copo de maíz (1 unidad)	Granix	8,8 ± 2,02	0,74
Tostada de mesa (1cm^2)	Bimbo	7,8 ± 0,51	1,01
Pasa de uva (1 unidad)	La Sultanita	6,7 ± 0,76	1,70
Pastilla frutal (1 unidad)	La Yapa - Stani	12,7 ± 2,7	1,70
Queso pategrás (1cm^3)	Sancor	5,6 ± 1,5	0,65
Copos de maíz a_w = 0,33 (1 unidad)	Granix	6,7 ± 2,4	0,77
Copos de maíz a_w = 0,75 (1 unidad)	Granix	8,7 ± 3,1	0,77
Fracturabilidad			
Manzana fresca (1cm^3)	Granny Smith	4,6 ± 1,94	0,32
Copo de maíz (1 unidad)	Granix	8,6 ± 2,58	0,32
Tostada de mesa (1cm^2)	Bimbo	7,1 ± 2,1	1,01
Bizcocho dulce (1cm^2)	Tía Maruca	7,5 ± 1,92	0,91
Gomita masticable (1 unidad)	Eucalipto - Mogul	0,1 ± 0,01	0,93
Galletita dulce (1cm^2)	Manon - Terrabusi	7,2 ± 1,7	1,25
Copos de maíz (a_w = 0,33) (1unidad)	Tres Arroyos	10,3 ± 0,9	1,36
Copos de maíz (a_w = 0,75) (1unidad)	Tres Arroyos	4,6 ± 1,8	1,36
Cohesividad			
Gomita masticable (1 unidad)	Frutal - Mogul	11,3 ± 0,8	2,95
Gomita masticable (1 unidad)	Frutal - Dori	7,6 ± 2,2	2,95
Pasa de uva (1 unidad)	La Sultanita	8,2 ± 1,8	1,70
Peras deshidratadas (1/2 unidad)	Carrefour	7,5 ± 1,9	0,65
Bombón de fruta (1 cm^2)	La Cabaña	4,1 ± 1,6	0,65
Tostada de mesa (1 cm^2)	Bimbo	0,1 ± 0,02	0,53
Gomita masticable (1 unidad)	Eucalipto - Mogul	10,3 ± 1,5	0,93
Copos de maíz (a_w = 0,33) (1unidad)	Tres Arroyos	0,2 ± 0,5	0,78
Copos de maíz (a_w = 0,75) (1unidad)	Tres Arroyos	8,1 ± 1,3	0,78
Queso pategrás (1cm^3)	Ilolay	2,9 ± 1,1	0,65
Adhesividad al paladar			
Queso untable (1/2 cucharita de té)	Tholem	7,5±1,1	1,64
Queso crema (1/2 cucharita de té)	Mendicrim	4,4±0,5	1,64
Dulce de leche (1/2 cucharita de té)	Clásico - Sancor	5,1±0,9	0,91
Miel (1/2 cucharita de té)	Carrefour	3,7±1,7	1,52

4.2. Correlación instrumental – sensorial de escalas de textura

Los alimentos de referencia de las escalas texturales fracturabilidad, dureza, cohesividad, elasticidad, gomosidad, adhesividad al paladar y viscosidad (ver **Materiales y Métodos sección 3.7.1.3**) fueron evaluados instrumentalmente con el objetivo de poder correlacionar la medida sensorial con la instrumental. Las muestras de referencia de las escalas de viscosidad y masticabilidad fueron reemplazadas por alimentos similares de marca reconocidas en el mercado local.

4.2.1. Análisis instrumental de las escalas de textura

Los resultados obtenidos de los ensayos de doble compresión realizados según lo detallado en **Materiales y Métodos, sección 3.8.2.1** para los alimentos de las escalas de fracturabilidad, dureza, cohesividad, elasticidad, gomosidad y adhesividad al paladar se detallan en la **Tabla 4-3** y de los ensayos de viscosidad en la **Tabla 4-4**.

Con los resultados obtenidos del análisis del Perfil de Textura se estudió la asociación entre los parámetros mecánicos a través del coeficiente de correlación de Pearson. La dureza correlacionó fuertemente con la fracturabilidad ($r = 0,94$, $p < 0,0001$). En general, se observó que las muestras que presentaban altos valores de dureza registraron bajos valores de cohesividad (muestras no deformables). Se observó una correlación significativa entre la elasticidad y la cohesividad ($r = 0,85$, $p < 0,0001$). Las mediciones instrumentales de cohesividad (A_2/A_1) fueron altamente dependientes de la elasticidad de las muestras. Por ejemplo, los caramelos masticables, que presentaron poco elasticidad, mostraron valores de cohesividad muy bajos debido al escaso contacto con la muestra durante la segunda mordida o segunda compresión. Por lo tanto, el área bajo la curva de la segunda compresión fue prácticamente insignificante. Este comportamiento también fue observado y reportado por Meullenet y col. (1997) cuando evaluaron la correlación instrumental-sensorial de algunas escalas de textura incluyendo la cohesividad.

Tabla 4-3. Promedio de los valores instrumentales y su correspondiente desviación estándar para los alimentos de referencia determinados mediante TPA.

Dureza (N)	
Queso crema (CC)	2,7 ± 0,1
Clara de huevo (CH)	7,7 ± 1,5
Salchicha (S)	66,2 ± 4,4
Aceituna (A)	75,7 ± 18,9
Maní (MK)	267,5 ± 55,6
Chocolate (CHOC)	539,0 ± 76,5
Caramelo duro (SD)	1330 ± 180
Fracturabilidad (N)	
Budín (B)	0
Tapita de alfajor (TA)	19,4 ± ,.9
Galletita Criollita (GC)	35,8 ± 9,9
Galletita Melita (GM)	65,1 ± 7,2
Tostadita (T)	261,9 ± 57,2
Pastilla DRF (DRF)	718,7 ± 61,4
Caramelo duro (SD)	1164 ± 269
Cohesividad (-)	
Budín (B)	0,23 ± 0,02
Queso Holanda (QH)	0,24 ± 0,04
Caramelo Frutifru (CF)	0,08 ± 0,02*
Pasa de uva (PU)	0,34 ± 0,03
Gomita Mogul (GMo)	0,78 ± 0.,02
Caramelo Sugus (CS)	0,13 ± 0,03*
Gomosidad (N)	
40% masa de harina (40%)	0,50 ± 0,05
45% masa de harina (45%)	1,6 ± 0,4
50% masa de harina (50%)	3,1 ± 1,2
55% masa de harina (55%)	6,3 ± 1,9
60% masa de harina (60%)	13,4 ± 1,7
Adhesividad al paladar (J)	
Margarina (M)	0,007 ± 0,002*
Mermelada de durazno (MD)	0,0028 ± 0,0006
Dulce de leche (DDL)	0,010 ± 0,002
Queso Tholem (QT)	0,011 ± 0,001
Mantequilla de maní (MM)	0,015 ± 0,003
Elasticidad (-)	
Queso crema (CC)	0,5 ± 0,1
Gomita mogul (GM)	0,78 ± 0,02
Relleno de merengada (RM)	0,79 ± 0,01
Gelatina 1 (G1)	0,88 ± 0,04
Gelatina 2 (G2)	0,96 ± 0,01

*Valores no considerados para la correlación.

Tabla 4-4. Promedio de los valores de viscosidad y su correspondiente desviación estándar para los alimentos de referencia determinados mediante reómetro dinámico.

Viscosidad (cP)	
Agua	3,74 ± 0,84
Crema liviana	147 ± 8
Crema pesada	25,8 ± 16
Salsa de chocolate	506 ± 9
Mezcla: 1/2 taza de mayonesa + 2 cucharas de crema pesada	1254 ± 38
Leche condensada	2688 ± 48

La correlación entre la gomosidad y la dureza fue altamente significativa (r = 0,71; p<0,0001) y entre la gomosidad y la cohesividad fue despreciable (r = 0,06; p = 0,76). El hecho de que la medición física A_2/A_1 no fue una medida representativa de cohesividad en algunos alimentos puede explicar la pobre correlación con la gomosidad.

Con el análisis de componentes principales se estudio la relación espacial entre los atributos mecánicos y las muestras (**Figura 4-2**). La viscosidad no se consideró en este análisis porque no se obtuvo con el ensayo de doble compresión. Las dos primeras componentes principales (CP) explicaron el 52% y el 29% de la variabilidad de los datos (**Tabla 4-5**). La CP 1 fue representada positivamente por dureza y fracturabilidad y negativamente por elasticidad, adhesividad al paladar y cohesividad. El segundo eje fue definido positivamente por gomosidad y elasticidad (**Tabla 4-6, 4-7**).

Los caramelos duros (CD) y las pastillas DRF (DRF) fueron ubicados en el cuadrante positivo de la CP 1 y CP 2, muy cerca de los atributos de dureza y fracturabilidad. Se ha demostrado en las escalas sensoriales que estas muestras tienen dos características dominantes (dureza y fracturabilidad). Las muestras chocolate (CHOC), tostada (T), aceituna (A), galletita Melita (GM), galletita Criollita (GC), budín (B), tapita de alfajor (TA), caramelos Frutifru (CF) y maní (M) se colocaron en el cuadrante positivo de la CP 1 y en el cuadrante negativo de la CP 2. Estos alimentos no tienen una característica textural dominante, pero todas ellas carecen de elasticidad, adhesividad al paladar y cohesividad

Por otro lado, las muestras mermelada de durazno (MD), salchicha (S), queso crema (CC), pasas de uva (PU), margarina (M), clara de huevo (CH), las masas de harina (40, 45, 50, 55 y 60%), gelatina (G1), dulce de leche (DL), relleno de la merengada (RM), mantequilla de maní (MM) y el queso holanda (QH) fueron ubicados en el cuadrante negativo de la CP 1 indicando que estos alimentos no tienen una característica dominante

individual, pero presentan tres características relevantes (elasticidad, adhesividad al paladar y cohesividad). Gelatina (G2) y gomita Mogul (GMo) mostraron dos características dominantes (elasticidad y gomosidad).

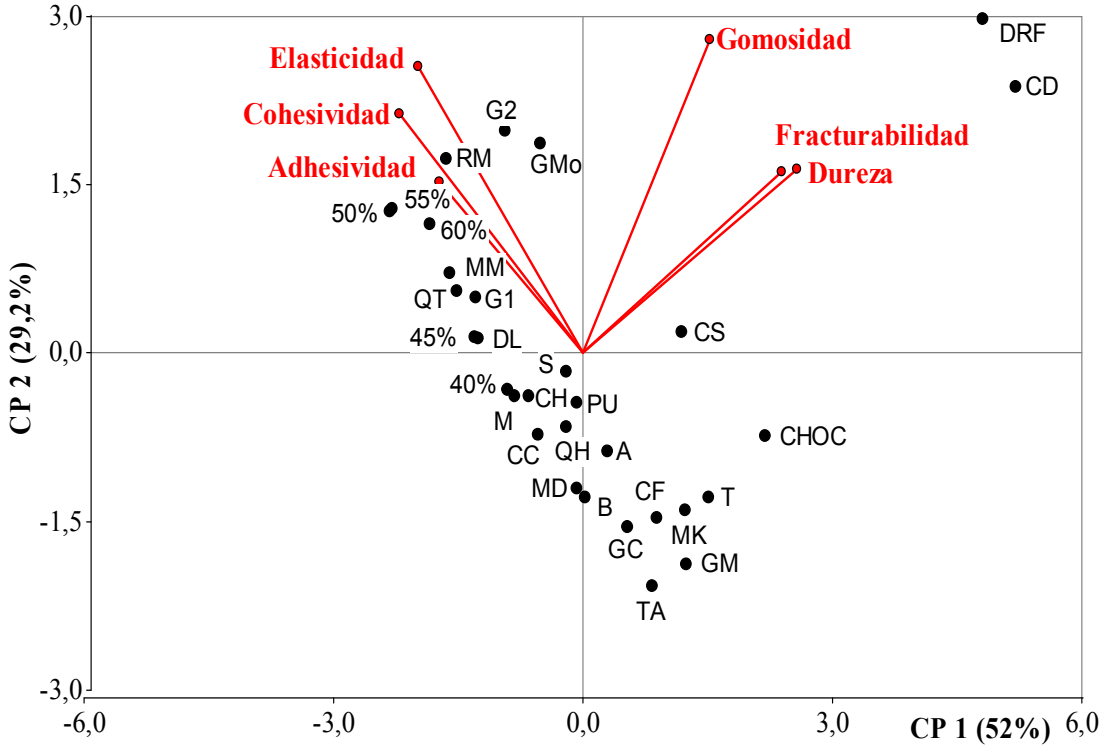


Figura 4-2. Análisis de componentes principales para los parámetros obtenidos del ensayo de doble compresión. (●) alimentos de referencia de las escalas texturales.

Tabla 4-5, 4-6 y 4-7. Autovalores, autovectores y correlaciones correspondientes al análisis PCA de los parámetros obtenidos de la curvas de doble compresión para los alimentos de referencia de las escalas texturales.

Autovalores			
CP	Valor	Proporción	Prop.Acum.
1	3,12	0,52	0,52
2	1,75	0,29	0,81

Autovectores		
Variables	CP 1	CP 2
Fracturabilidad	0,47	0,31
Dureza	0,5	0,32
Adhesividad	-0,34	0,3
Elasticidad	-0,38	0,5
Cohesividad	-0,43	0,41
Gomosidad	0,3	0,54

Correlaciones con las variables originales		
Variables	CP 1	CP 2
Fracturabilidad	0,82	0,42
Dureza	0,89	0,42
Adhesividad	-0,59	0,39
Elasticidad	-0,68	0,66
Cohesividad	-0,76	0,55
Gomosidad	0,52	0,72

Valor en rojo representa la variable (s) más relevante(s) de la componente principal.

4.2.2. Correlación entre el atributo sensorial y la propiedad instrumental

Para cada escala estudiada se evaluó la correlación entre los puntajes sensoriales (x) de los alimentos de referencia y su correspondiente medida instrumental (y). Como los valores sensoriales (valores fijos) utilizados para la correlación instrumental-sensorial fueron los reportados por Szczesniak y col. (1963) y Hough y col. (1994) se utilizaron estos últimos como variable independiente (x). La medida instrumental (con su correspondiente desviación estándar) fue utilizada como la respuesta del modelo, es decir, variable dependiente. Szczesniak y col. (1963) utilizaron también el valor sensorial como variable independiente cuando estudiaron las correlaciones para algunos atributos de textura con alimentos procedentes de USA.

En la **Figura 4-3** se observan las correlaciones obtenidas para las escalas de textura. En general se obtuvieron buenas correlaciones ajustándose a un modelo no lineal. A excepción de la escala de adhesividad, las curvas de las correlaciones presentaron una concavidad hacia arriba, indicando que alimentos con baja medida instrumental podrían ser mejor discriminados por el valor sensorial y viceversa, alimentos con alto valor sensorial podrían ser mejor discriminados por el valor instrumental.

Las correlaciones para dureza, fracturabilidad, cohesividad, viscosidad, gomosidad y elasticidad se ajustaron a la siguiente relación exponencial:

$$y = a \cdot e^{b \cdot x} \qquad \textbf{(4-1)}$$

En cambio la curva de adhesividad al paladar presentó una concavidad hacia abajo y fue ajustada por el siguiente modelo:

$$y = a \ln(x) - b \qquad \textbf{(4-2)}$$

donde y: medida instrumental, x: puntaje sensorial, a y b: parámetros.

En la literatura existe una gran controversia sobre las correlaciones instrumentales-sensoriales. Meullenet y col. (1998) reportaron que los coeficientes de correlación entre los datos sensoriales e instrumentales aumentaron utilizando transformaciones logarítmicas en los datos. Yuan y Chang (2006) utilizaron el análisis de Perfil de Textura (TPA) para obtener la dureza y la elasticidad instrumental en queso de soja obteniendo buenas correlaciones lineales instrumental- sensorial, mientras que Szczesniak y col. (1963) reportaron una relación no lineal entre la dureza sensorial y los valores instrumentales obtenidos con un texturómetro.

La utilización de la relación no lineal en los ajustes de las curvas puede atribuirse a una distorsión de los estímulos físicos en el sistema sensorial o pérdida de la sensibilidad a medida que aumenta su intensidad. Los valores sensoriales se obtienen de escalas no estructuradas de 15 cm; este tipo de medición puede introducir distorsiones adicionales (Cardello y col, 1982; Meullenet y col, 1998).

En la **Tabla 4-8** se detallan los parámetros correspondientes a los modelos de las escalas de textura estudiadas. El coeficiente de determinación indicó que entre el 86% y 99% de la variabilidad en los valores de la correlación para dureza; fracturabilidad, viscosidad, cohesividad y gomosidad podría ser explicada por la ecuación 1. En el caso de la adhesividad al paladar, la variabilidad explicada por la ecuación 2 fue de 89%.

En la escala de adhesividad al paladar y cohesividad algunos alimentos no fueron considerados en la correlación debido a que no correlacionaron adecuadamente entre la medida instrumental y el valor sensorial. Para la escala de cohesividad, sólo cuatro alimentos de referencia fueron utilizados para determinar la correlación instrumental-sensorial, ya que las muestras de caramelos masticables (sin elasticidad) presentaron mediciones instrumentales muy bajas. Un alimento cohesivo con poca elasticidad (caramelos masticables) presentará valores muy bajos de A_2/A_1 (cohesividad instrumental) debido al escaso contacto entre el émbolo y el alimento durante la segunda compresión. Meullenet y col. (1997, 1998) reportaron que la evaluación de la relación A_2/A_1 depende de la evaluación de la relación d_2/d_1 (es decir, la elasticidad del alimento) y la pobre correlación entre la cohesividad instrumental y sensorial en muestras sin elasticidad. Lyon y col. (1980) también reportaron escasa correlación entre las evaluaciones sensoriales e instrumentales para la cohesividad de carne de ave de criadero (poco elástico).

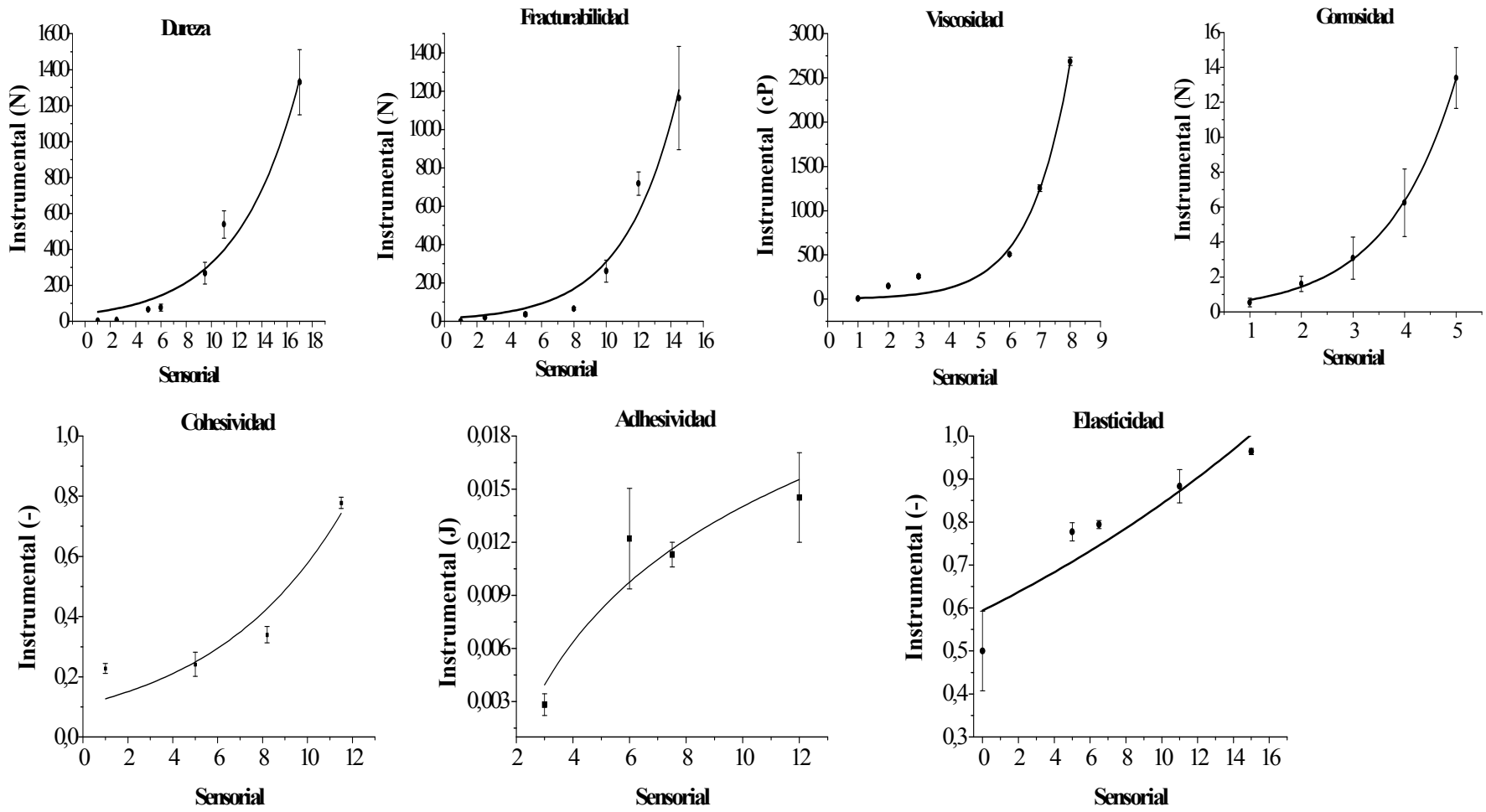


Figura 4-3. Correlaciones instrumentales-sensoriales para los parámetros texturales. (●) dato experimental; (—) modelo; (I) barra de error.

Tabla 4-8. Parámetros estimados de los modelos obtenidos de las correlaciones instrumentales-sensoriales de las escalas de textura.

Modelo [a]: $y = a \cdot e^{b \cdot x}$				
Escalas	a	b	Variabilidad explicada R^2 (%)	Fisher [b]
Dureza	42,2 ± 14,9	0,21 ± 0,02	97,5	152,3***
Fracturabilidad	15,2 ± 8,6	0,33 ± 0,04	96,7	120,4***
Viscosidad	5,9 ± 3,6	0,77 ± 0,08	98,8	303,2***
Cohesividad	0,11 ± 0,05	0,17 ± 0,04	90,6	42,9**
Gomosidad	0,33 ± 0,02	0,74 ± 0,02	99,9	5495,7***
Elasticidad	0,59 ± 0,05	0,03 ± 0,01	85,6	269,6***
Modelo[a]: $y = a \ln(x) - b$				
	a	b	Variabilidad explicada R^2 (%)	Fisher [b]
Adhesividad al paladar	0,0084 ± 0,0021	0,0052 ± 0,0039	89,2	57,7**

[a] y= medida instrumental, x: valor sensorial; [b] ***1% ,**5% nivel de significación.

La descripción de la percepción sensorial de la cohesividad no puede ser bien caracterizada por la medición instrumental A_2/A_1 para alimentos con diferentes características, pero si podría ser un buen indicador para grupo de alimentos elásticos como geles (Meullenet y col. 1998). Di Mónaco y col (2008) reportaron correlaciones no lineales pobres entre las mediciones sensoriales e instrumentales de la dureza, cohesividad y elasticidad utilizando alimentos de referencia.

En la escala de adhesividad se observó que la medida instrumental de la margarina no correlacionó adecuadamente con su valor sensorial. En investigaciones previas realizadas en el grupo se registró que la textura de este tipo de alimentos fue afectada por pequeños cambios de temperatura distorsionando la medición. Szczesniak y col. (1963) informaron que los alimentos de referencia de las escalas deben presentar mínimos cambios en sus propiedades cuando hay pequeños cambios de temperatura. Chauvin y col. (2009) reportaron que algunos alimentos de la escala de adhesividad no fueron bien percibidos por los panelistas. Esta discrepancia puede ser atribuida a la preferencia sobre el gusto y a la inhabilidad del panelista para mantener el alimento dentro de su boca por la cantidad de tiempo requerido para realizar adecuadamente la medición.

4.2.3. Validación externa de algunas correlaciones estudiadas

Para validar las correlaciones obtenidas, se ensayaron instrumentalmente y sensorialmente nuevos alimentos por el panel entrenado, tal como se detalla en **Materiales y Métodos, secciones 3.7.1.3**. En la **Tabla 4-9** se detallan los resultados instrumentales y sensoriales de los alimentos evaluados y los valores sensoriales obtenidos con los modelos de correlación.

No se encontraron diferencias significativas entre las evaluaciones emitidas por los panelistas indicando la consistencia del panel. El análisis del test de Student entre el valor sensorial observado y predicho demostró que los modelos propuestos predicen adecuadamente el atributo sensorial de los nuevos alimentos (valores de probabilidad "p" no significativos a un nivel de significación del 5%). En general, los atributos adhesividad al paladar y cohesividad exhibieron grandes intervalos de confianza siendo la correlación hallada menos representativa. Esto puede atribuirse a que el método instrumental utilizado para medir estas propiedades mecánicas no quiebra la muestra, mientras que la técnica sensorial sí lo hace.

4.2.4. Conclusiones del estudio de escalas sensoriales

Algunas escalas de referencia utilizadas por el método del Perfil de Textura fueron instrumental y sensorialmente ensayadas usando alimentos argentinos. Se encontraron correlaciones no lineales útiles entre la medida instrumental y el valor sensorial para algunos atributos de textura con alimentos argentinos. Los modelos propuestos fueron validados adecuadamente con los nuevos alimentos ensayados instrumental y sensorialmente. Se observaron algunos problemas con las determinaciones de cohesividad en muestras levemente elásticas y con las evaluaciones en adhesividad en muestras sensibles a pequeños cambios de temperatura. Las medidas instrumentales de cohesividad fueron confiables en muestras elásticas. Es importante desarrollar en el futuro una medida instrumental representativa de la cohesividad en muestras no elásticas.

A través de los modelos obtenidos para algunos atributos sensoriales se logró validar el método instrumental y las escalas texturales (adaptadas) utilizadas en esta tesis. Voisey (1971) y Harker y col. (1997) indicaron que la relevancia de la medida instrumental depende de cuan bien predice el atributo sensorial.

Tabla 4-9. Promedio y desvío estándar de la medida instrumental, sensorial observada y sensorial predicha para los nuevos alimentos.

Alimento (tamaño, temperatura)	Tipo/Marca Productor	Medida instrumental	Valor sensorial predicho[1]	Valor sensorial observado[2]	P-valor[3]
Dureza (N)					
Galletita (1 cm^2 , ambiente)	Manon -Terrabusi	223,1 ± 60,8	7,6 ± 1,3	7,96 ± 0,65	0,697*
Manzana fresca (cilindro de 3cm de diámetro y 1cm de espesor, 5-10ºC)	Granny Smith	293,2 ± 30,3	8,8 ± 1,1	7,82 ± 0,97	0,307*
Manzana escaldada (cilindro de 3cm de diámetro y 1cm de espesor, 5-10ºC)	Granny Smith- 90s en vapor	196,2 ± 24,5	6,99 ± 1,25	6,56 ± 0,69	0,638*
Fracturabilidad (N)					
Galletita (1 cm^2, ambiente)	Manon - Terrabusi	223,1 ± 60,8	8,1 ± 1,8	7,2 ± 1,7	0,563*
Pastilla (1unidad, ambiente)	La Yapa – Stani	1007 ± 233	12,7 ± 2,3	12,7 ± 2,7	0.990*
Adhesividad al paladar (J)					
Queso crema(1/2 cucharadita, 5-10ºC)	Mendicrim - Nestlé	0,0045 ± 0,0009	3,2 ± 2,6	4,4 ± 0,5	0,515*
Dulce de leche (1/2 cucharadita, 5-10ºC)	Clasico - Sancor	0,0042 ± 0,0001	3,1 ± 2,6	5,1 ± 0,9	0,335*
Cohesividad (-)					
Gomita (1 unidad, ambiente)	Anillo frutal Mogul – Arcor	0,75±0,02	11,3 ± 2,7	10,2 ± 1,5	0,581*

[1]Valor sensorial predicho con los modelos de la ecuación 4-1, 4-2; [2]Valor sensorial observado con el panel entrenado; [3]P-valor correspondiente a la comparación de los valores sensoriales usando el test Student; * Valor no significativo α=0.05.

4.3. Efecto de los tratamientos en las propiedades reológicas, en la textura y en la estructura

4.3.1. Tratamiento térmico

Las placas de manzana fueron tratadas térmicamente con vapor saturado durante 90 (E1) y 150 (E2) segundos con el objetivo de estudiar el efecto del escaldado, tal como se describe en **Materiales y Métodos, sección 3.3.3.1**. Para ambos tiempos se utilizaron termocuplas de Cu-Co para medir la temperatura en el centro de la placa (punto frío) de manzana. Como se observa en la **Figura 4-4**, el punto frío de la placa alcanza 100ºC después de 65 segundos de exposición al vapor.

La **Figura 4-5** muestra el perfil típico de temperatura del vapor saturado registrado simultáneamente con otra termocupla durante el tratamiento para verificar la constancia de la temperatura de calentamiento a lo largo del tiempo.

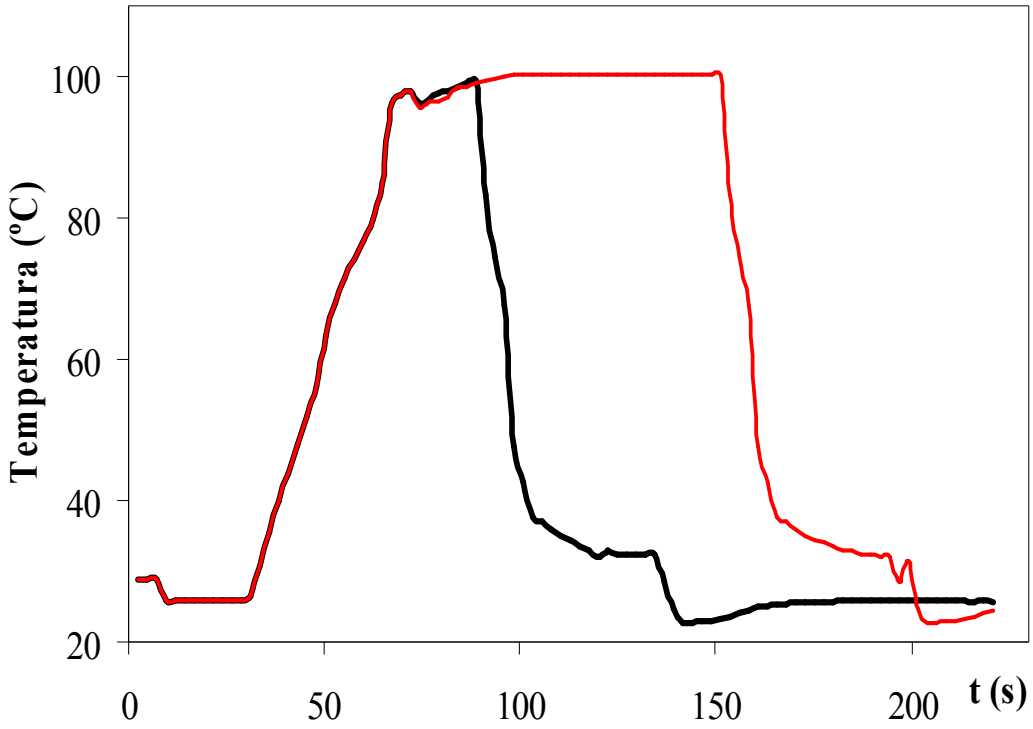


Figura 4-4. Evolución de la temperatura en el centro de placas de manzanas durante el tratamiento térmico con vapor. (—) 90 s, (—) 150 s.

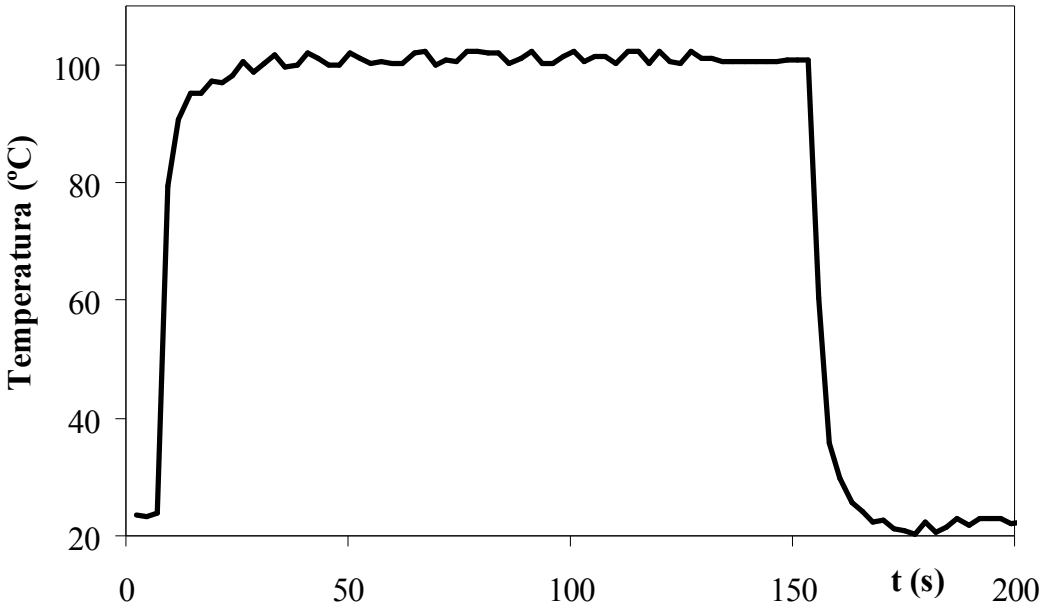


Figura 4-5. Perfil típico de temperatura del vapor saturado durante el tratamiento térmico de placas de manzana.

4.3.1.1. Propiedades reológicas

Las propiedades reológicas fueron evaluadas a bajas deformaciones a través de ensayos oscilatorios y de fluencia-recuperación y a altas deformaciones mediante un ensayo de doble compresión o doble mordida (análisis del Perfil de Textura, TPA).

- **Ensayos oscilatorios**

Primero se determinó el rango viscoelástico lineal (RVL) de las muestras mediante un barrido de amplitud con control de la deformación de cizalla (BA CDC). El mismo se realizó para deformaciones entre 0,001% y 100% utilizando una frecuencia constante (ω) de 10 s^{-1}. Para determinar la frecuencia seleccionada se consideraron estudios previos realizados en el grupo en donde se observó que a valores menores de frecuencia las mediciones presentaban mucha dispersión (Martínez y col., 2005). Como se observa en la **Figura 4-6,** el valor del RVL límite para las muestras control fue de 0,0085 % y para las escaldadas durante 90 segundos fue de 0,11%. El tratamiento térmico incrementó el RVL de las muestras. Estos resultados se corroboran con los resultados de Martínez y col.

(2005), quienes reportaron que los tejidos de frutas tratados (tratamiento térmico, osmótico, etc.) presentaban un RVL mayor al de los tejidos frescos, y aún más, al ir aumentando la severidad del tratamiento, aumentaba el RVL.

Los ensayos de barrido de frecuencia con control de la deformación de cizalla (BF CDC) se realizaron para valores de frecuencia entre 100 s^{-1} hasta 0,1 s^{-1}, dentro del RVL recomendado para las muestras frescas (0,005 %). Se utilizó este último para asegurar que todas las muestras evaluadas estuvieran dentro de los límites de linealidad.

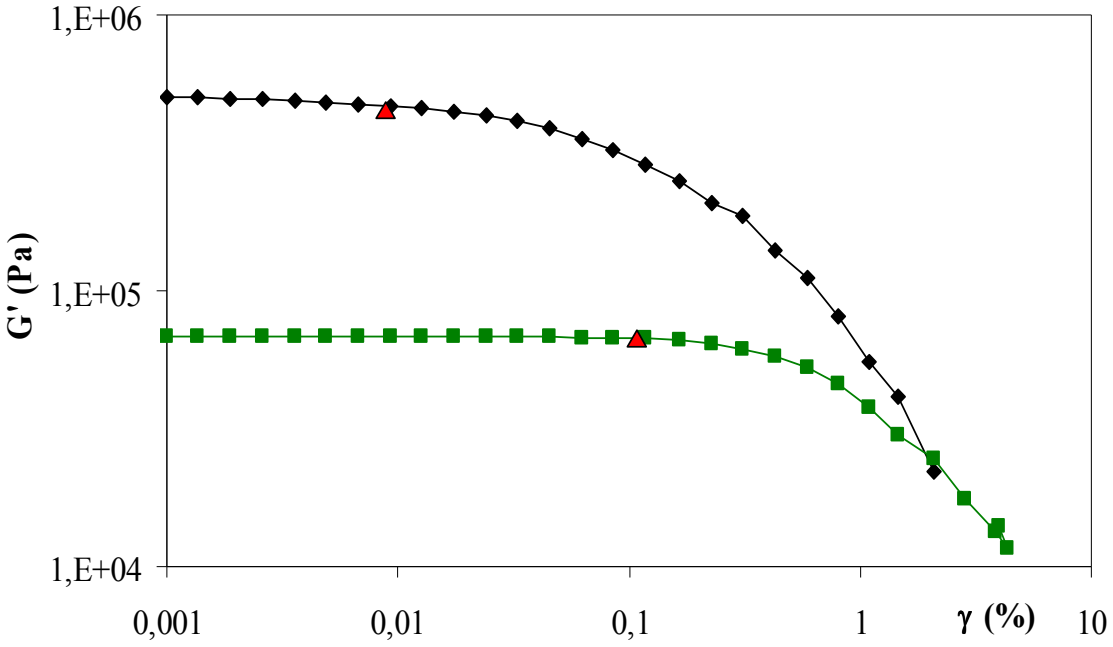


Figura 4-6. Barrido de amplitud con control de la deformación de cizalla de tejido de manzana control y escaldado 90 s. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (▲) valor límite recomendado de RVL.

La **Figura 4-7** muestra el espectro mecánico promedio de las muestras control y escaldadas durante distintos tiempos. En todas las muestras, los valores del módulo de almacenamiento (G') excedieron a los valores del módulo de pérdida (G'') a lo largo de todo el rango de frecuencia, indicando un dominante comportamiento sólido. Las muestras tratadas presentaron menores valores del módulo de pérdida y del módulo de almacenamiento en todo el rango de frecuencia.

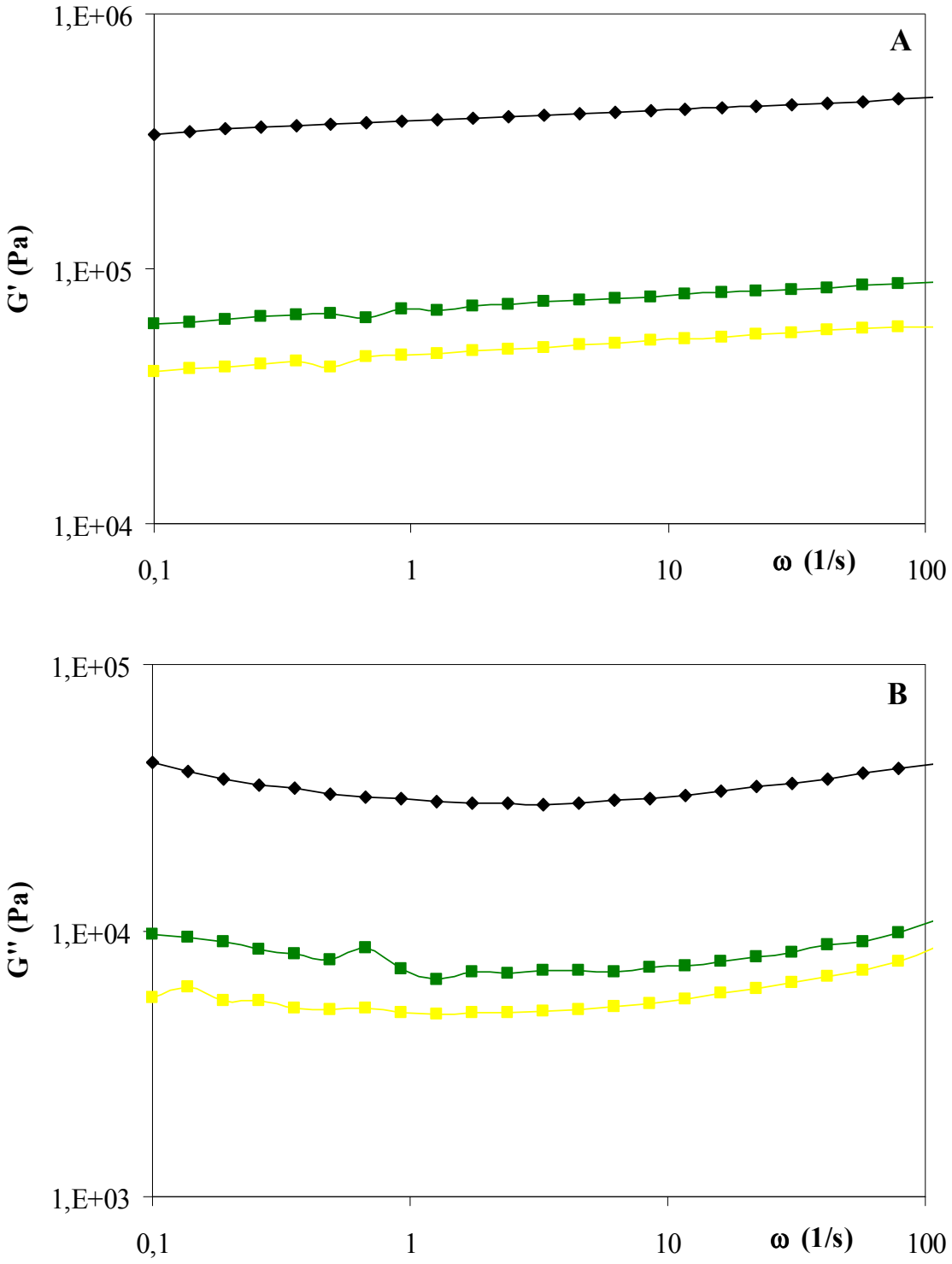


Figura 4-7. Barrido de frecuencia a γ = 0,005% en función de la frecuencia angular (ω = 100 – 0.1 s^{-1}) de tejido de manzana fresco y escaldado. A) módulo de almacenamiento (G'), B) módulo de pérdida (G''). (♦) control, (■) escaldado 90 s, (■) escaldado 150 s.

Los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G") presentaron una ligera dependencia con la frecuencia angular. La dependencia del módulo de almacenamiento fue directamente proporcional a la frecuencia angular, es decir, un leve incremento en el módulo se correspondió con un aumento de la frecuencia.

Para establecer posibles diferencias significativas en el módulo de almacenamiento entre los tratamientos y el control, las curvas fueron comparadas desde un punto de vista puramente estadístico (Costell y Duran, 1978). Los puntos experimentales de las curvas de G' fueron transformados utilizando logaritmo, luego se ajustaron a una regresión lineal para describir el comportamiento de cada curva debido a su simplicidad y porque el ajuste se adecuaba perfectamente. Posteriormente se analizó la significación de la diferencia entre la regresión conjunta del control con cada tratamiento (E1 y E2) y la suma de las regresiones para el control y las tratadas por separado, mediante el test de Fisher. Evaluados los resultados se encontraron diferencias significativas entre el control y las muestras tratadas y entre las muestras tratadas (E1 y E2) (**Tabla 4-10**).

La disminución de G' en las muestras escaldadas indicaría una pérdida del carácter elástico, siendo más relevante en las muestras escaldadas durante 150 segundos.

Tabla 4-10. Resumen del análisis de varianza de los parámetros de regresión de las curvas de G' de tejido de manzana fresco y escaldado distinto tiempo.

Origen de la varianza	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio del error	Fisher
C	2,41	227	0,01	
E1	1,25	227	0,01	
E2	1,71	227	0,01	
C+E1	48,12	457	0,11	
Σ (C+E1)	3,66	454	0,01	1838***
Δ [(C+E1)- Σ (C+E1)]	44,46	3	14,82	
C+E2	73,97	457	0,16	
Σ (C+E2)	4,12	454	0,01	
Δ [(C+E2)- Σ (C+E2)]	69,85	3	23,28	2565***
E1+E2	5,94	457	0,01	
Σ (E1+E2)	2,96	454	0,01	
Δ [(E1+E2)- Σ (E1+E2)]	2,98	3	0,99	152***

C+E1 = Ajuste de Control +E1; Σ= suma (ajuste C + ajuste E1); Δ = Diferencia (ajuste de C+ E1 – Σ); ***1% nivel de significación.

La dependencia de G" con la frecuencia angular fue más compleja y los resultados no se pudieron ajustar. En todas la muestras, G" disminuyó con el aumento de la

frecuencia angular a bajas frecuencias (0,1-1%), permaneció sin variación a frecuencias entre 1-10 %, y luego presentó un aumento gradual a frecuencias más altas (10-100%). Al igual que G', el módulo de pérdida disminuyó en las muestras tratadas térmicamente. En general, el factor de pérdida (tg δ = G"/G') no fue un parámetro muy sensible para distinguir diferencias en las propiedades viscoelásticas de las muestras escaldadas, si bien indicó un ligero incremento relativo de la componente viscosa en las muestras tratadas térmicamente respecto de la manzana control. (**Figura 4-8**).

Los espectros mecánicos reportados para manzana fresca y osmotizada (Martínez y col, 2007), papa fresca y tratada térmicamente (Alvarez y col, 1998), melón fresco y osmotizado (Martínez y col, 2005) y pera fresca y osmotizada (Wu y Guo, 2010) mostraron el mismo patrón que los obtenidos en esta tesis.

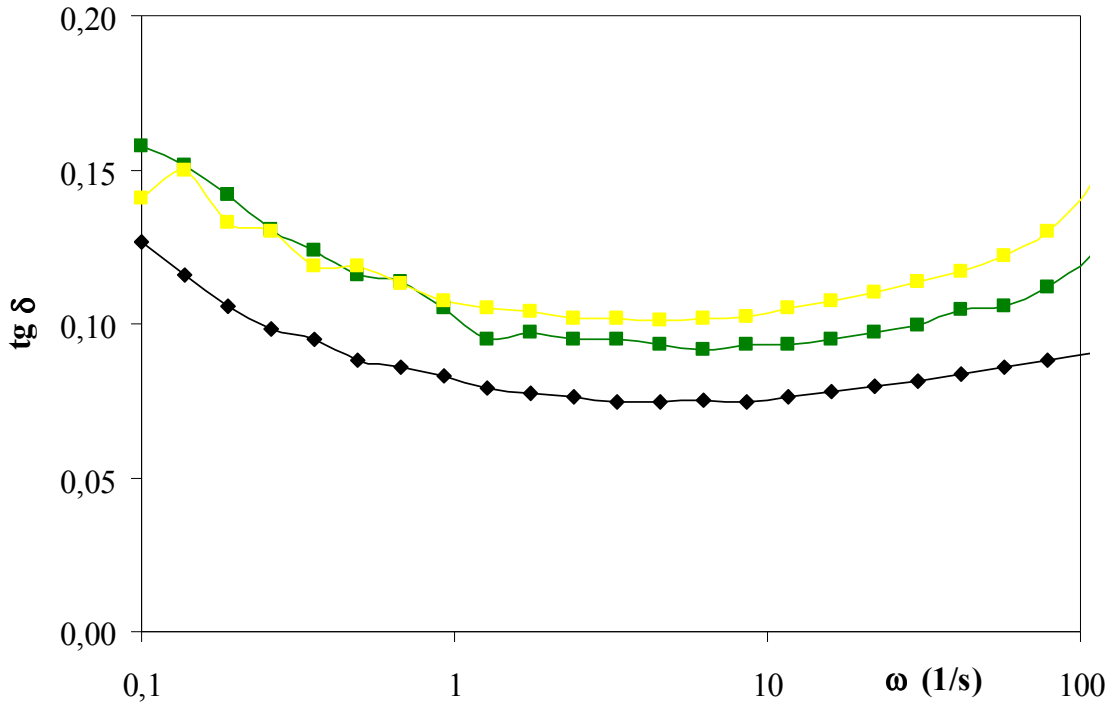


Figura 4-8. Factor de pérdida (tg δ) para el tejido de manzana fresco y escaldado. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (■) escaldado 150 s.

- **Ensayo de fluencia – recuperación**

Se realizó un barrido de amplitud con control del esfuerzo de cizalla (BA CEC) para determinar el rango viscoelástico lineal y en consecuencia el esfuerzo a aplicar. El

RVL recomendado por el software del equipo fue de 50 Pa (**Figura 4-9**). Considerando estos resultados se decidió trabajar con un esfuerzo de 35 Pa, valor en el cual todas las muestras se encontraban dentro del rango viscoelástico lineal.

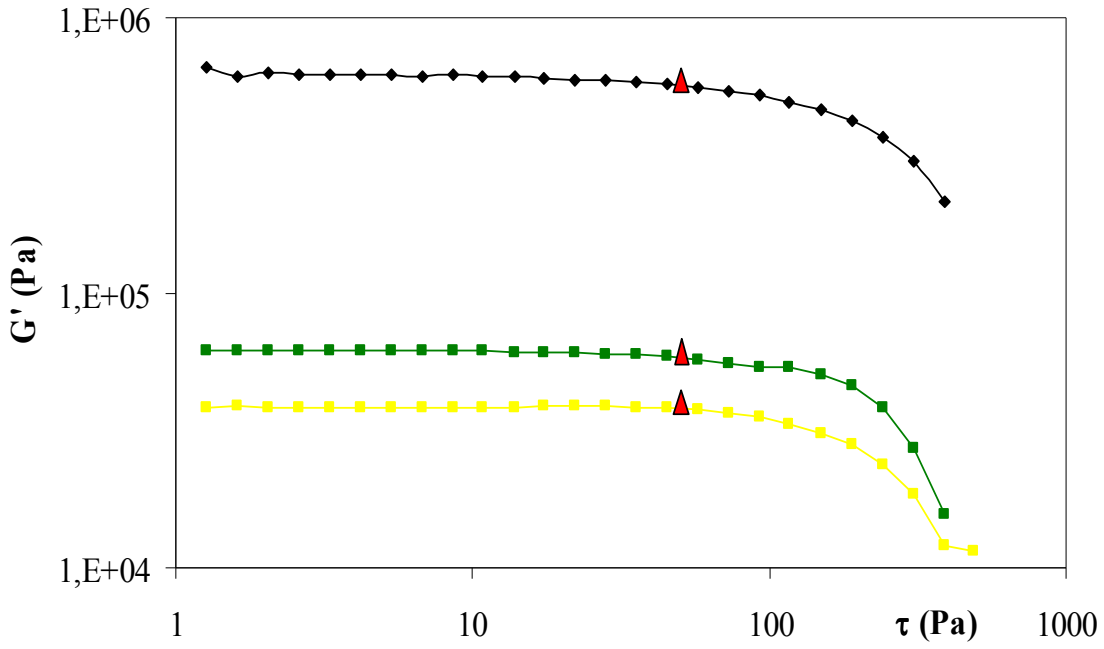


Figura 4-9. Barrido de amplitud con control del esfuerzo de cizalla para el tejido de manzana fresco y escaldado. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (■) escaldado 150 s (▲) valor límite recomendado de RVL.

En las **Figura 4-10** se representan las curvas experimentales promedio de deformación obtenidas del ensayo de fluencia para las muestras control, E1 y E2. Como se observa en el gráfico el efecto del escaldado a diferentes tiempos provocó una mayor deformación en la etapa de fluencia y de recuperación con respecto al control.

Los datos experimentales se ajustaron en primer lugar mediante el modelo Kelvin Voigt generalizado con un elemento de Kelvin-Voigt, obteniéndose coeficientes de correlación < 0,9. Para mejorar la predicción los datos fueron ajustados utilizando el modelo Kelvin Voigt generalizado con dos elementos de Kelvin-Voigt (**Ecuación 3-5**), obteniéndose coeficientes de correlación > 0,999 (**Tabla 4-11**). En **Figura 4-11** se observan las curvas de capacitancia modeladas promedio para las muestras control, E1 y E2.

Los parámetros del modelado de las curvas de fluencia presentaron diferencias significativas ($F_{12,40}$ = 6,83; p<0,0001) entre los tejidos escaldados con respecto al control. Además se observaron diferencias significativas entre los tiempos de escaldado.

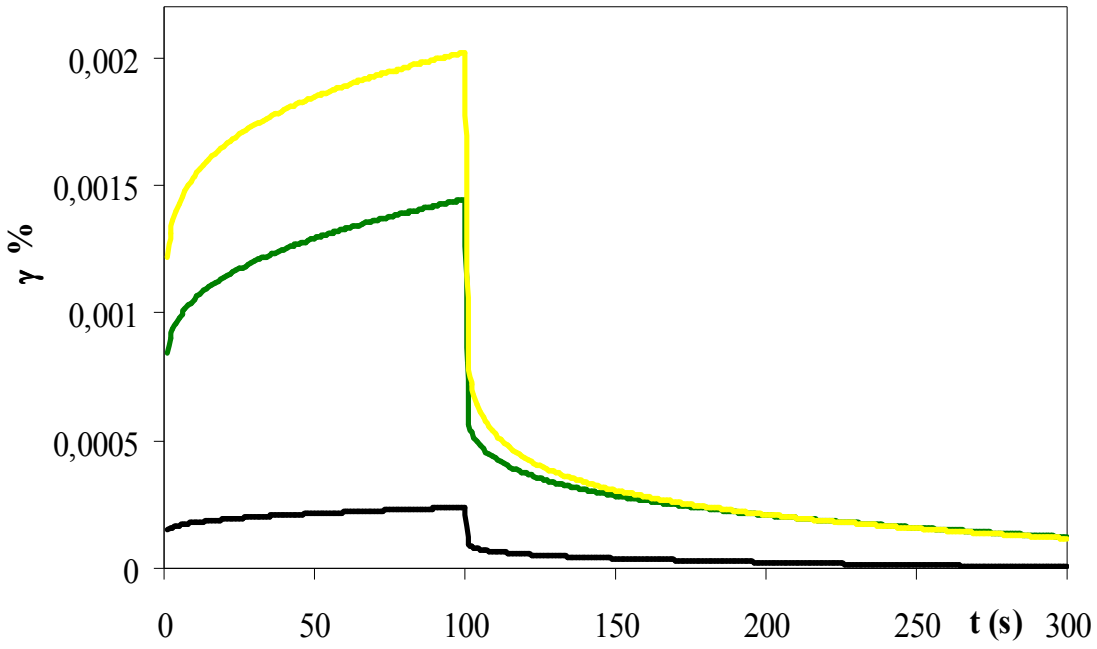


Figura 4-10. Curvas promedio de fluencia – recuperación para el tejido de manzana fresco y escaldado. (▬) control, (▬) escaldado 90 s, (▬) escaldado 150 s.

Tabla 4-11. Parámetros promedio de las curvas de fluencia* y su correspondiente desviación estándar del tejido de manzana fresco y escaldados.

Tratamiento	J_0 (1/Pa) (x10^5)	J_1 (1/Pa) (x10^5)	J_2 (1/Pa) (x10^5)	λ_1 (s)	λ_2 (s)	η_N (Pa.s) (x10^{-7})	
C	0,25 ± 0,05 59,5%**	0,07 ± 0,02 15,6%**	0,039 ±0,007 9,3%**	24,6 ± 5,8	2,34 ± 0,41	15,1 ± 6,8 15,6%**	a
E1	1,57 ± 0,22 56,3%**	0,49 ± 0,05 17,5%**	0,31 ± 0,03 12,1%**	22,6 ± 1,9	2,58 ± 0,28	1,97 ± 0,29 14,2%**	b
E2	2,2 ± 0,4 54,8%**	0,69 ± 0,14 16,8%**	0,47 ± 0,09 10,7%**	20,6 ± 1,2	2,4 ± 0,1	1,79 ± 0,32 17,6%**	c

* Parámetros obtenidos a partir de la ecuación 3-5.
** Contribución relativa de cada tipo de capacitancia a la capacitancia total al final de la etapa de fluencia.
Tratamientos con igual letra no presentan diferencias significativas con un 95 % de nivel de confianza.

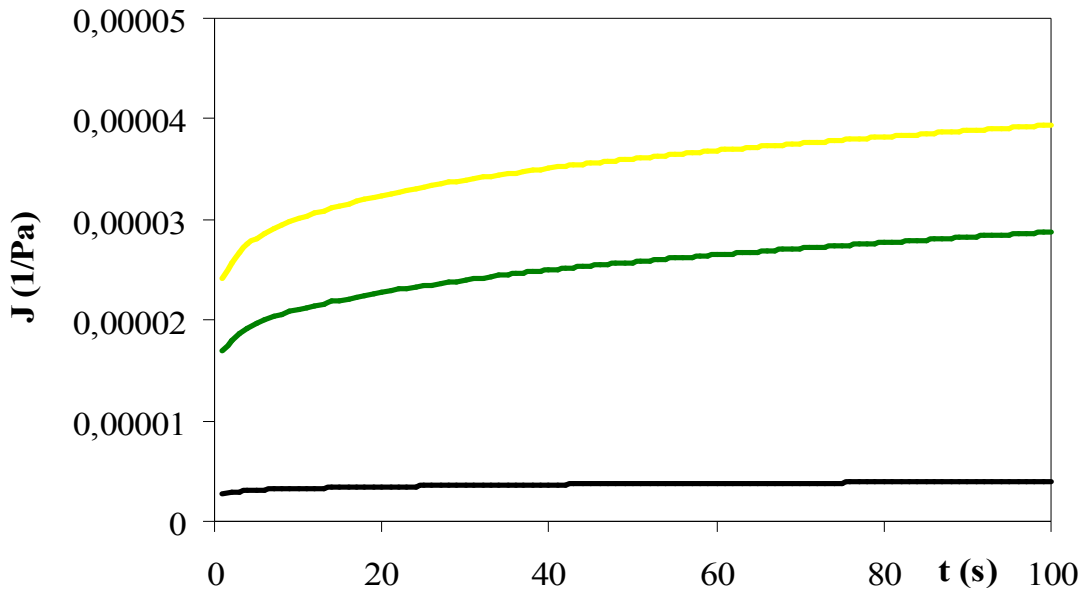


Figura 4-11. Curvas modeladas promedio de capacitancia (etapa de fluencia) para el tejido de manzana fresco y escaldado**.** (**—**) control, (**—**) escaldado 90 s, (**—**) escaldado 150 s.

La capacitancia instantánea (J_0) aumentó en las muestras tratadas, indicando una disminución en el modulo elástico instantáneo ($E_0 = 1/J_0$). Las capacitancias de retardo (J_1 y J_2) y la capacitancia viscosa del estado estacionario ($1/\eta_N$) también mostraron un incremento (aproximadamente 7 veces y 8 veces respectivamente) en las muestras escaldadas con respecto al control (tejido fresco). El escaldado produjo una pérdida de elasticidad y rigidez, y un aumento en la fluidez del tejido.

Los tiempos de retardo correspondientes a los dos elementos de Kelvin-Voigt difirieron aproximadamente en un orden de magnitud para todas las muestras. El tiempo de retardo λ_1 para las muestras escaldadas decreció levemente con respecto al control, mientras que λ_2 fue similar para todos las muestras. Estos parámetros representan el tiempo requerido para que la deformación de los elementos estructurales asociados con el comportamiento viscoelástico alcance el 63 % de la máxima deformación. El menor tiempo de retardo perteneciente al segundo elemento de Kelvin refleja la conducta viscoelástica de los tejidos a tiempos relativamente cortos, siendo entonces este elemento el responsable de una mayor estabilidad estructural (Jackman y Stanley, 1995 b). Por lo tanto, para tejidos frescos y tratados, los elementos estructurales asociados con la segunda

unidad de Kelvin alcanzarían el equilibrio más rápidamente que aquellos elementos pertenecientes a la primera unidad de Kelvin.

El aumento de la capacitancia al final de la fase de fluencia de las muestras escaldadas durante 90 segundos fue aproximadamente de 600% en comparación con la muestra fresca y de 850% para las muestras escaldadas durante 150 segundos. La contribución relativa de cada capacitancia a la capacitancia total, para el tejido de manzana fresco comparado con el tratado, se encontró dentro de los siguientes rangos: 54 – 66 % para J_0; 16,8 - 18 % para J_1; 10 - 12 % para J_2 y 5 – 17 % para $1/\eta_N$. Esta última contribución se denomina plasticidad (% P) y se define como la relación entre la deformación no recuperable o permanente y la deformación total (J) calculada a los 100 s. La mayor contribución estuvo dada por la capacitancia instantánea (J_0) en todos los casos estudiados, mientras que la mayor variación en la contribución relativa debido al tratamiento se observó en la capacitancia viscosa ($1/\eta_N$), a expensas de la contribución elástica. Las contribuciones de las demás capacitancias se mantuvieron sin grandes variaciones.

A pesar de que los ensayos se realizaron con un número considerable de replicados, los valores medios de los parámetros de las curvas de capacitancia presentaron valores de desviación estándar grandes, especialmente en el caso de las muestras frescas. Estos errores no se alejan de los que normalmente se obtienen en las mediciones de propiedades de fluencia de tejidos frutihortícolas. Esta gran variabilidad puede atribuirse a varias causas, entre otras anisotropía de los tejidos vegetales, heterogeneidad en las propiedades reológicas en células aparentemente homogéneas de un mismo tejido, edad de las células, aspectos climáticos y prácticas agronómicas y madurez en la cosecha (Mittal y Mohsenin, 1987; Pitt, 1992; Alzamora y col., 2008).

Se analizó la relación espacial de los parámetros de las curvas de fluencia con cada muestra realizando un análisis de componentes principales (PCA). En la **Figura 4-12** se observa la representación gráfica de las componentes principales 1 y 2 (CP1 y CP2). Las primeras dos componentes explican 82,8 % y 17,2 % de la varianza de los datos respectivamente (**Tabla 4-12**).

El primer componente principal está representado positivamente por la capacitancia instantánea (J_0) y las capacitancias de retardo (J_1 y J_2) y negativamente por el coeficiente de viscosidad (η_N) y el tiempo de retardo 1 (λ_1). La segunda componente principal está definida por el tiempo de retardo 2 (λ_2) positivamente (**Tabla 4-13, 4-14**). Las muestras escaldadas fueron colocadas en el cuadrante positivo de la CP1 y el control en el cuadrante

negativo de dicha componente principal. Analizando la ubicación de las muestras y las variables presentes en el cuadrante, se observa que el escaldado produjo un aumento en las capacitancias (J_0, J_1 y J_2) y una disminución en el coeficiente viscoso (η_N) y el tiempo de retardo 1 (λ_1).

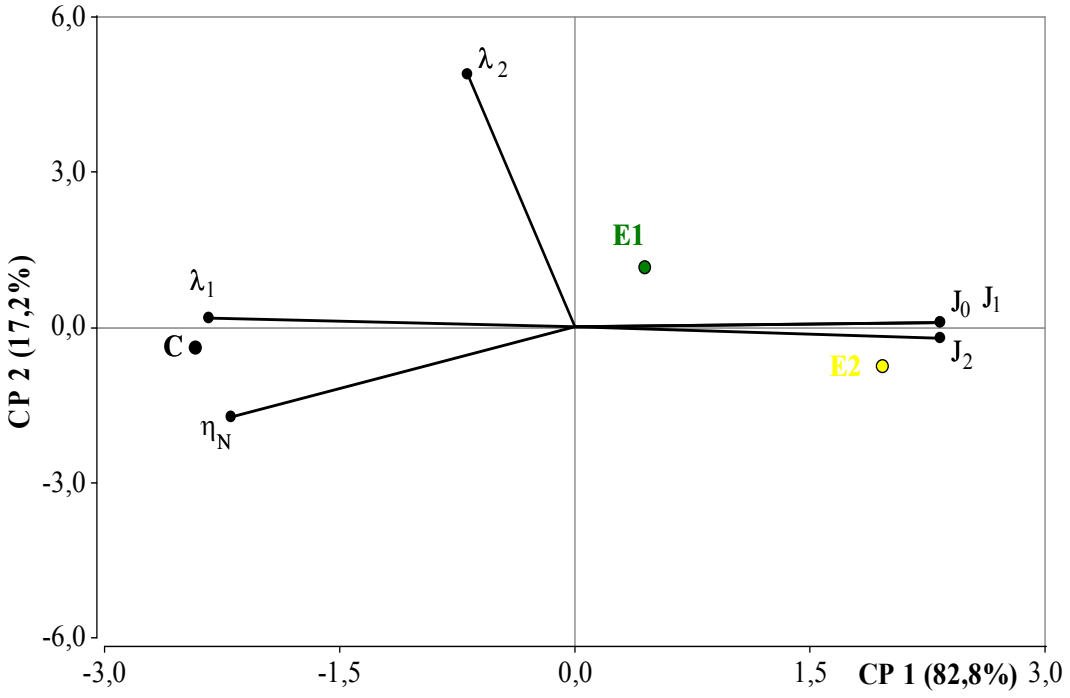


Figura 4-12. Análisis de componentes principales para los parámetros de las curvas de capacitancia de la fase de fluencia para el tejido de manzana fresco y escaldado. (●) control, (●) escaldado 90 s, (●) escaldado 150 s.

Tabla 4-12, 4-13 y 4-14. Autovalores, autovectores y correlaciones correspondiente al análisis PCA de los parámetros de la curva de capacitancia de la fase de fluencia para el tejido de manzana fresco y escaldado distinto tiempo.

Autovalores			
CP	Valor	Proporción	Prop. Acum.
1	4,97	0,83	0,83
2	1,03	0,17	1

Autovectores		
Variables	CP 1	CP 2
J_0	0,45	0,02
J_1	0,45	0,02
J_2	0,45	-0,04
λ_1	-0,45	0,04
λ_2	-0,13	0,94
η_N	-0,42	-0,33

Correlaciones con las variables originales		
Variables	CP 1	CP 2
J_0	1	0,02
J_1	1	0,02
J_2	1	-0,04
λ_1	-1	0,04
λ_2	-0,29	0,96
η_N	-0,94	-0,34

Valor en rojo representa la variable (s) más relevante(s) de la componente principal

- **Ensayos de doble compresión**

En la **Figura 4-13** se observa el comportamiento de las curvas fuerza-tiempo obtenidas por la doble compresión en manzana fresca y manzanas escaldadas distintos tiempos. Los perfiles de las muestras frescas y escaldadas presentaron un pico marcado al comienzo del ensayo asociado a la dureza y/o fracturabilidad del material. La muestra fresca y escaldada durante 90 segundos presentó un segundo pico al final de la primera compresión. Este último también fue tenido en cuenta para caracterizar a la muestra. Bourne (1981) reportó que si el primer pico observado en una curva de doble mordida para caracterizar frutas y vegetales es menor al segundo pico registrado en la primera compresión, el primer pico representa la fracturabilidad del material y el segundo la dureza. En cambio, si el primer pico es mayor que el segundo pico, el primer pico se asocia con la dureza y la fracturabilidad del material. Por último si la muestra presenta un solo pico en la primera fase se lo asocia con la dureza y se considera que la muestra no es fracturable.

Para las condiciones utilizadas en este ensayo, el tejido fresco y escaldado durante 90 segundos presentó dureza y fracturabilidad caracterizados en el primer pico marcado de la curva. Las curvas mostraron después del pico máximo varios picos consecutivos que fueron asociados con muestras crujientes. El perfil del tejido de manzana escaldado durante 150 segundos mostró un pico menor asociado a la dureza y la ausencia del segundo pico y de los picos consecutivos a continuación del pico máximo. Por lo tanto el aumento del tiempo de escaldado resultó en una muestra con menor dureza y con pérdida total de la fracturabilidad.

Las muestras escaldadas presentaron un incremento de la fuerza con el tiempo no tan abrupto y más gradual que el que se observó en manzana fresca. Este comportamiento refleja una pérdida de dureza debido al tratamiento y una mayor deformabilidad para la ruptura, necesitándose una menor fuerza para obtener la misma deformación. Se ha reportado que el tratamiento térmico en frutas y vegetales produce una disminución de la firmeza en el tejido a causa de la disrupción de la membrana celular y la consecuente pérdida de turgencia. Las células cuando pierden la presión de turgor son más deformables resultando en una textura más blanda y gomosa (Thiel y Donald, 2000; Lillfort, 2001).

A partir de las curvas se calcularon los distintos parámetros del TPA instrumental (**Tabla 4-15**).

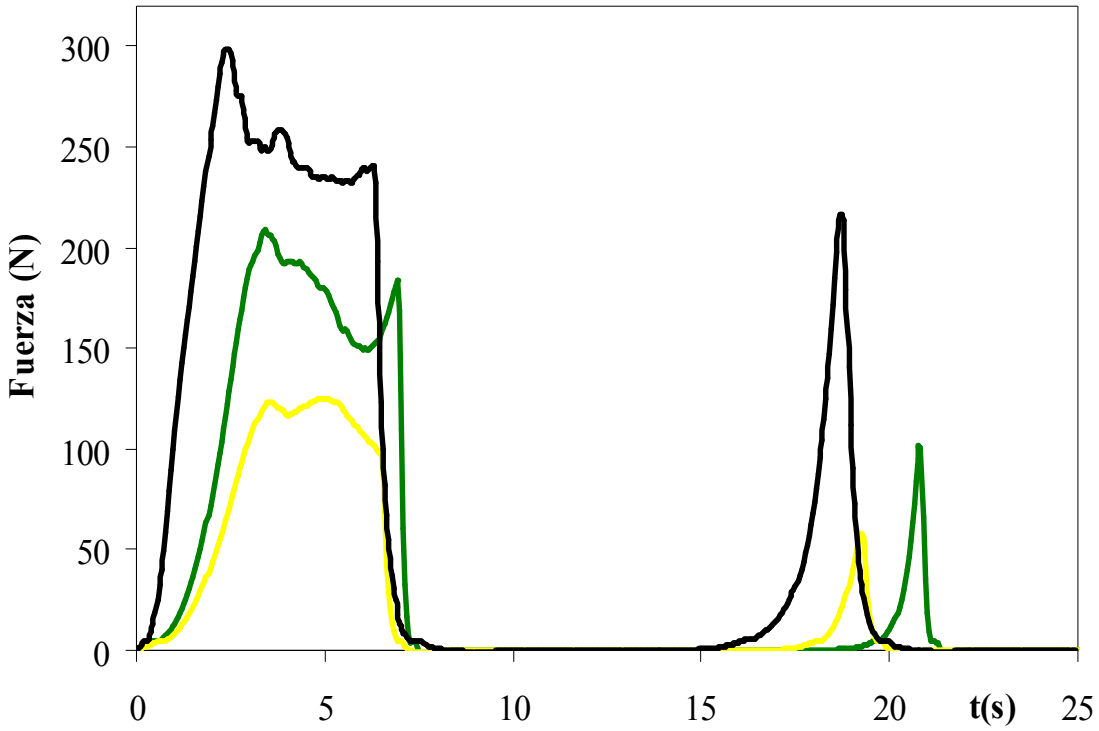


Figura 4-13. Curvas típicas de doble compresión de tejido de manzana fresco y escaldado distinto tiempo. (—) control, (—) escaldado 90 s, (—) escaldado 150 s.

Evaluando a las muestras a través de sus parámetros característicos se encontraron diferencias significativas ($F_{20,158}$ = 209; p<0,0001) entre ellas. El control difirió significativamente con ambas muestras escaldadas y existieron diferencias entre ambos tratamientos.

En la **Tabla 4-15** se muestra el comportamiento de los parámetros mecánicos por el efecto del tratamiento. En general todos los parámetros disminuyeron por efecto del escaldado, siendo esta disminución más abrupta para las muestras con mayor tiempo de escaldado (E2). Considerando los parámetros más relevantes, el escaldado produjo un ablandamiento del tejido, reflejado en una menor dureza y fracturabilidad; y una menor fuerza para lograr la misma deformación, lo que se tradujo en un menor trabajo para la ruptura.

Tabla 4-15. Parámetros promedio y su correspondiente desviación estándar de las curvas de doble compresión de tejido de manzana fresco y escaldado distinto tiempo.

Tratamiento	Fracturabilidad (N)	Dureza (N)	Dureza 2 (N)	Área 1 (J)	Área 2 (J)	Elasticidad (-)	Cohesividad (-)	Gomosidad (N)	Masticabilidad (N)	E_d (N/mm^2)	
C	317,3 ± 22,1	317,3 ± 22,1	225,4 ± 19,8	1,39 ± 0,13	0,13 ± 0,01	0,66 ± 0,05	0,10 ± 0,01	30,64 ± 3,73	20,34 ± 3,49	1,96 ± 0,35	a
E1	194,9 ± 14,8	194,9 ± 14,8	81,75 ± 11,07	0,7 ± 0,07	0,04 ± 0,01	0,47 ± 0,04	0,05 ± 0,01	10,02 ± 1,35	4,7 ± 0,92	0,67 ± 0,08	b
E2	No detectado	116,7 ± 27,6	64,54 ± 11,67	0,44 ± 0,1	0,03 ± 0,01	0,41 ± 0,08	0,07 ± 0,01	7,98 ± 1,84	3,32 ± 0,99	0,36 ± 0,1	c

Tratamiento con igual letra no presentan diferencias significativas con un 95 % de nivel de confianza.

Estos resultados son coincidentes con los hallados por Dan y col. (2004) quienes reportaron una disminución en la dureza y en el área 1 para manzanas (var. Fuji y var. Orion) escaldadas en agua a 90ºC durante 50 minutos.

Además de los parámetros obtenidos de las curvas según los lineamientos de Bourne (1978), se calculó el módulo de deformabilidad, parámetro mecánico de gran relevancia. Para ello, los datos de la primera compresión de la curva fuerza - tiempo fueron transformados en valores de esfuerzo o tensión real vs deformación real. El módulo de deformabilidad fue calculado a partir de la pendiente en la región lineal inicial de la curva esfuerzo real – deformación real, hasta un 20 % de la deformación real. Este parámetro es un indicador de la rigidez del tejido cuando se aplican esfuerzos pequeños (Mohsenin y Mittal, 1977). El escaldado produjo una pérdida de la rigidez bien marcada.

Utilizando el análisis de componentes principales se analizó la relación entre los parámetros mecánicos y las muestras (**Figura 4-14**). La CP1 explicó el 94 % de la variabilidad de los datos y estuvo representada positivamente por dureza en la primera compresión, la dureza en la segunda compresión, el modulo de deformabilidad, el trabajo realizado en la primera compresión (área 1), el trabajo realizado en la segunda compresión (área 2), la elasticidad, la gomosidad y la masticabilidad. La segunda componente explicó el 5,6 % de la variabilidad de los datos y estuvo definida positivamente por la cohesividad y negativamente por la fracturabilidad (**Tablas 4-16, 4-17 y 4-18)**.

Las muestras no se diferenciaron por un parámetro dominante. Los tejidos escaldados se encuentran en el cuadrante negativo de la CP1 debido a que sus parámetros sufrieron una disminución por el tratamiento. El tejido escaldado durante 90 segundos se encuentra en el cuadrante negativo y el tejido escaldado 150 segundos en el cuadrante positivo de la CP 2; esta orientación se atribuye al cambio de fracturabilidad que sufrieron las muestras.

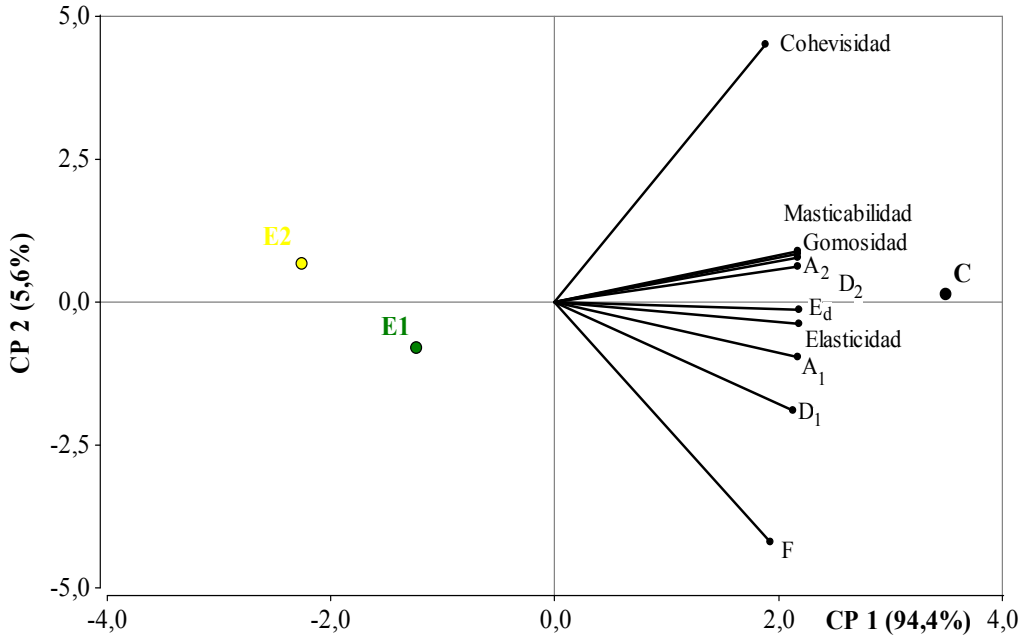


Figura 4-14. Análisis de componentes principales para los parámetros de las curvas de doble compresión de tejido de manzana fresco y escaldado. (●) control, (●) escaldado 90 s, (●) escaldado 150 s.

Tabla 4-16, 4-17 y 4-18. Autovalores, autovectores y correlaciones correspondientes al análisis PCA de los parámetros de la curva de doble compresión de tejido de manzana fresco y escaldado.

Autovalores			
CP	Valor	Proporción	Prop. Acum.
1	9,44	0,94	0,94
2	0,56	0,06	1

Autovectores		
Variables	CP1	CP2
Fracturabilidad (F)	0,29	-0,62
Dureza (D_1)	0,32	-0,28
Dureza 2 (D_2)	0,32	0,09
Área (A_1)	0,32	-0,14
Área 2 (A_2)	0,32	0,13
Elasticidad	0,33	-0,06
Cohesividad	0,28	0,67
Gomosidad	0,32	0,12
Masticabilidad	0,32	0,13
E_d	0,33	-0,02

Correlaciones con las variables originales		
Variables	CP1	CP2
Fracturabilidad (F)	0,88	-0,47
Dureza (D_1)	0,98	-0,21
Dureza 2 (D_2)	1	0,07
Área (A_1)	0,99	-0,11
Área 2 (A_2)	1	0,1
Elasticidad	1	-0,04
Cohesividad	0,86	0,5
Gomosidad	1	0,09
Masticabilidad	1	0,09
E_d	1	-0,02

Valor en rojo representa la variable(s) más relevante(s) de la componente principal.

4.3.1.2. Análisis sensorial de textura

Se evaluaron seis atributos de textura para cada muestra**.** Los atributos seleccionados fueron dureza, fracturabilidad, crujencia, jugosidad, cohesividad y adhesividad al paladar. Para la evaluación de las muestras los panelistas siguieron los criterios establecidos en la sección **Materiales y Métodos sección 3.7.1.3**. Los valores obtenidos de las muestras frescas y tratadas para cada atributo sensorial fueron utilizados para analizar la probable existencia de diferencias entre muestras (**Tabla 4-19).**

Tabla 4-19. Parámetros texturales promedio y su correspondiente desviación estándar obtenidos del análisis sensorial de tejido de manzana fresco y escaldado.

Tratamiento	Dureza	Fracturabilidad	Cohesividad	Crujencia	Jugosidad
C	$6,9 \pm 0,6^{a}$	$7,9 \pm 0,7^{a}$	$1,6 \pm 0,5^{a}$	$7,6 \pm 0,1^{a}$	$5,98 \pm 0,27^{a}$
E1	$5,9 \pm 0,9^{b}$	$5,6 \pm 0,6^{b}$	$2,7 \pm 0,8^{b}$	$6,2 \pm 0,6^{b}$	$5,22 \pm 0,46^{b}$
E2	$4,4 \pm 1,1^{c}$	$4,3 \pm 0,5^{c}$	$3,9 \pm 0,7^{c}$	$4,3 \pm 0,4^{c}$	$4,58 \pm 0,38^{c}$

Medias de una misma columna con igual letra no presentan diferencias significativas con un 95 % de nivel de confianza.

Analizando la dureza sensorial de las muestras, se encontraron diferencias significativas ($F_{2,21}$=26,6; p<0,0001) entre el control y ambas muestras escaldadas y también entre las muestras escaldadas. Los evaluadores percibieron menor dureza en las muestras escaldadas observándose una relación inversa entre la dureza y el tiempo de escaldado: a mayor tiempo de escaldado menor dureza. El factor "evaluadores" no mostró diferencias significativas ($F_{6,21}$=1,58; p=0,2) indicando la consistencia del panel en las evaluaciones. Es muy importante analizar este factor ya que indica el nivel de entrenamiento de los evaluadores y el nivel de confianza de los juicios emitidos por el panel.

La fracturabilidad sensorial de las muestras escaldadas decreció significativamente ($F_{2,12}$=264; p<0,0001) con respecto al control. Se observó una pérdida de fracturabilidad dependiente de la severidad del tratamiento. No se encontraron diferencias significativas entre los evaluadores ($F_{3,12}$=3,25; p=0,06) pero se observó una gran dificultad entre los panelistas para evaluar dicho parámetro.

La cohesividad sensorial mostró diferencias significativas ($F_{2,18}$=40,9; p<0,0001) entre el control y las muestras escaldadas. Las muestras tratadas mostraron mayor cohesividad, es decir, su deformación fue mayor antes de la ruptura que la que se observó en la manzana fresca. No se encontraron diferencias significativa entre los panelistas ($F_{5,18}$=2,5; p=0,07). Estos valores sensoriales no se correspondieron con la medida instrumental de cohesividad. Como se observó en la sección **Resultados 4.2.2**, la medida instrumental de cohesividad no fue representativa en alimentos que presentan poca elasticidad. Además, comparando la definición sensorial de cohesividad con la instrumental se observó que se evalúan conceptos diferentes. En la definición sensorial se evalúa cuanto se deforma la muestra antes de su ruptura; en cambio en la determinación instrumental se evalúa la relación entre el trabajo realizado para comprimir la muestra en la primera compresión (ruptura en muestras sin elasticidad) y el trabajo realizado durante la segunda compresión.

Los evaluadores informaron que todas las muestras no poseían adhesividad al paladar; por ello este parámetro no se informó en la **Tabla 4-18**.

La crujencia en la frutas es un parámetro textural muy importante. Los evaluadores encontraron diferencias significativas ($F_{2,21}$=349,8; p<0,0001) entre el control y las muestras tratadas. La exposición al vapor provocó una pérdida de la crujencia siendo ésta muy relevante en las muestras escaldadas durante 150 segundos. El panel fue consistente en sus juicios ($F_{6,21}$=1,74; p=0,16).

Se encontraron diferencias significativas ($F_{2,18}$=45,9; p<0,0001) para la jugosidad entre el control y las muestras tratadas ($F_{2,18}$=45,9; p<0,0001) . La jugosidad disminuyó en las manzanas escaldadas. No se encontraron diferencias significativas ($F_{5,18}$=0,97; p=0,46) entre los evaluadores.

En la **Figura 4-15** se observa el perfil de textura sensorial obtenido para la muestras control y escaldadas, pudiendo determinarse que a medida que progresa el tiempo de escaldado las muestras se presentan como menos duras, fracturables, jugosas y crujientes y más cohesivas.

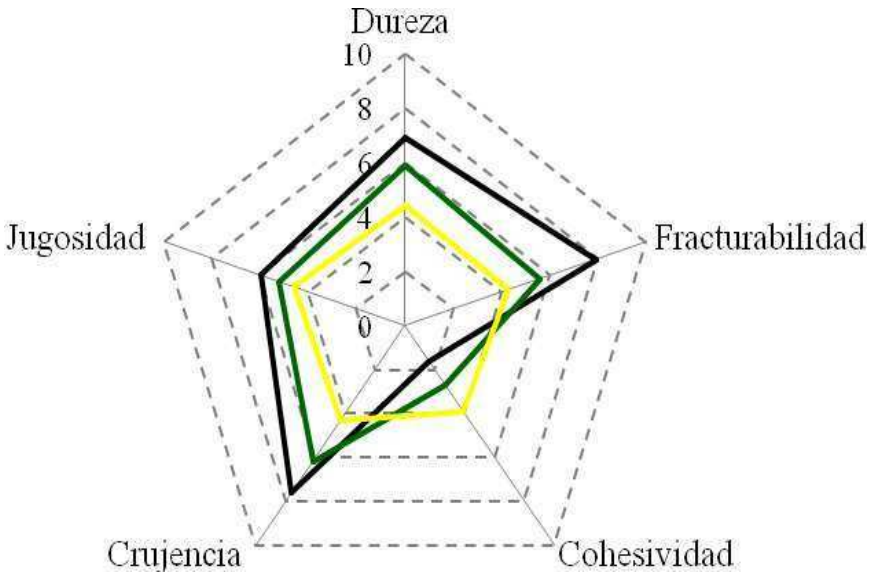


Figura 4-15. Perfil de Textura sensorial de tejido de manzana fresco y escaldado distinto tiempo. (—) control, (—) escaldado 90 s, (—) escaldado 150 s.

4.3.1.3. Correlación entre las propiedades reológicas y la textura utilizando regresión lineal de cuadrados mínimos parciales

Considerando la estructura de los datos experimentales, la regresión lineal por cuadrados mínimos parciales (PLS, P*artial Least Squares*) es el método adecuado para correlacionar las propiedades reológicas con la textura (variables sensoriales). PLS es un método estadístico multivariado que se utiliza cuando se desea predecir un conjunto de variables dependientes (Y) desde un conjunto (relativamente grande y posiblemente correlacionadas) de variables predictoras (X). El objetivo del método PLS es describir Y a partir de X y su estructura de variación común. Este tipo de análisis se usa cuando existe correlación entre las variables predictoras y/o existen más predictoras que observaciones.

4.3.1.3.1. Propiedades mecánicas (TPA)

Para el análisis de regresión lineal por cuadrados mínimos parciales se utilizaron los atributos texturales dureza (DS), fracturabilidad (FS), cohesividad (CS), jugosidad y crujencia como variables Y o dependientes, y los parámetros obtenidos del TPA (dureza,

fracturabilidad, dureza 2, área 1, área 2, cohesividad, elasticidad, gomosidad, masticabilidad y módulo de deformabilidad) como variables X o independientes.

Considerando el modelo de regresión de PLS con dos factores se logró explicar el 76,4 % de la variabilidad de los atributos texturales a través de los parámetros mecánicos. El factor PLS 1 logró explicar el 68,8 % y el factor PLS 2 el 7,6%. Como la inclusión de nuevos factores al modelo no mejoraba la predicción no fueron considerados en el mismo.

El factor PLS 1 explicó el 69,5 % de las variables X y el 68,8 % de las variables Y, mientras que el factor PLS 2 explicó el 25 % de las variables X y el 7,6 % de las variables Y. Analizando el modelo propuesto por dos factores, los atributos crujencia y dureza (71,5 y 45,8 % de la varianza explicada respectivamente) fueron los mejores explicados mientras que la cohesividad, jugosidad y fracturabilidad (37,1; 36,1 y 22,7 % de la varianza explicada respectivamente) fueron menos representativos (**Figura 4-16**).

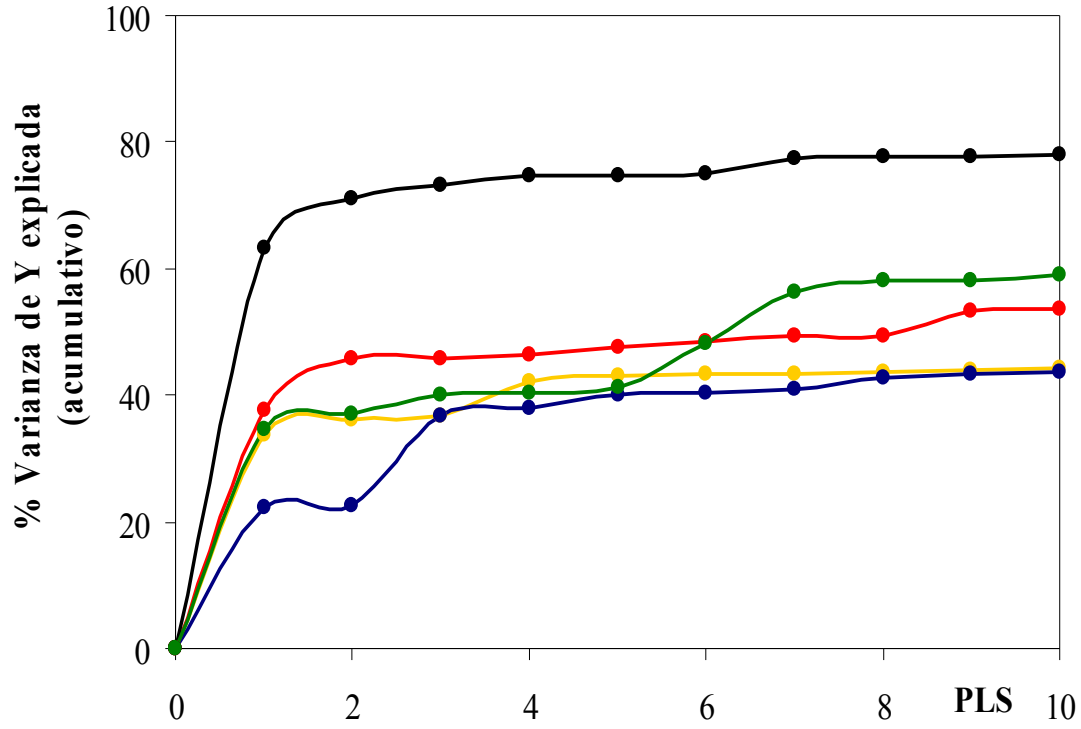


Figura 4-16. Porcentaje de varianza de los atributos sensoriales explicada por los parámetros mecánicos de tejido de manzana fresco y escaldado. (—) crujencia, (—) dureza, (—) cohesividad, (—) jugosidad, (—) fracturabilidad.

Las relaciones entre las variables sensoriales e instrumentales se observan en la **Figura 4-17**. Analizando la ubicación de las variables a través de los factores PLS 1 y PLS 2 se observa que la fracturabilidad instrumental está positivamente correlacionada con la crujencia y la dureza sensorial y negativamente relacionada con la cohesividad sensorial; que el área 1 y dureza instrumental están positivamente correlacionadas con la fracturabilidad sensorial y la jugosidad.

Las manzanas escaldadas durante 150 segundos fueron ubicadas en el cuadrante negativo de la PLS 1, las escaldadas durante 90 segundos en la zona central y las manzanas frescas en el cuadrante positivo indicando que en las muestras tratadas disminuyeron las propiedades mecánicas y casi todos los atributos sensoriales excepto la cohesividad que aumentó (**Figura 4-18**).

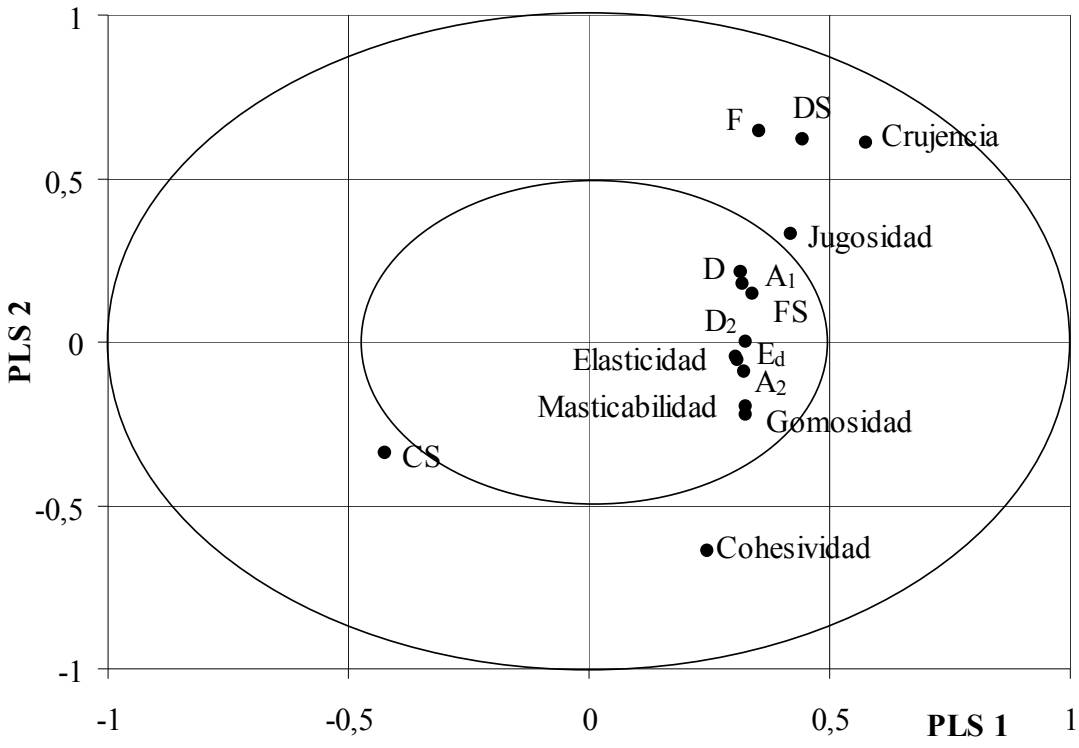


Figura 4-17. Correlación entre las variables del TPA y los atributos sensoriales para el tejido de manzana fresco y escaldado 90 s y 150 s.

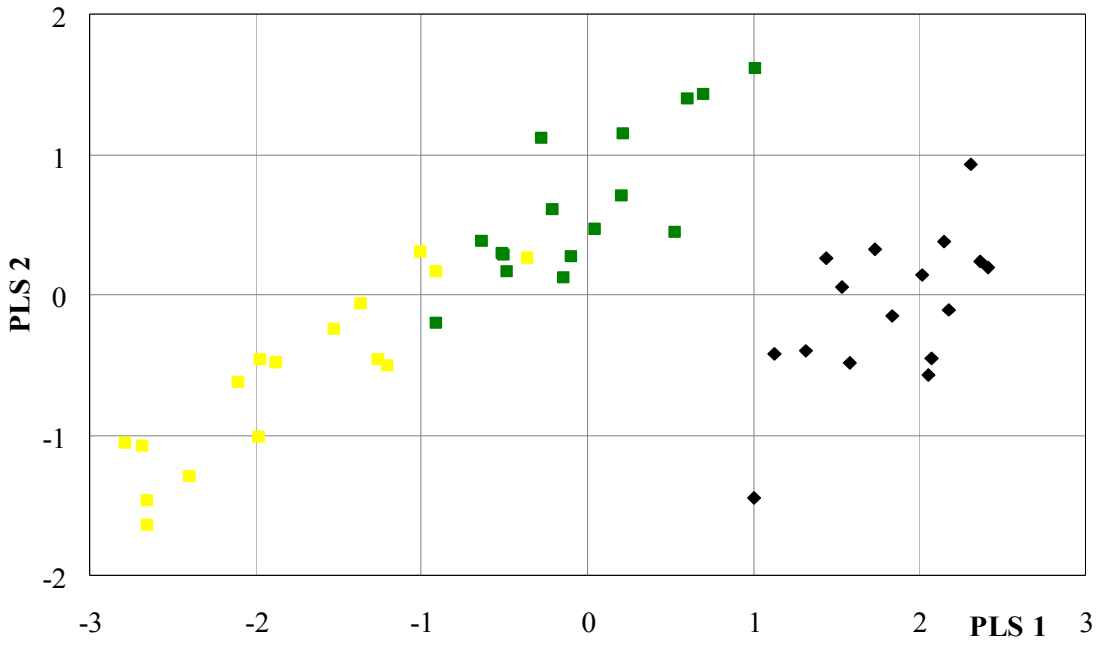


Figura 4-18. Ubicación del tejido de manzana fresco y escaldado distinto tiempo en función de la PLS 1 vs PLS 2. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (■) escaldado 150 s.

4.3.1.3.2. Parámetros de fluencia

Se estudio la correlación entre los parámetros de las curvas de fluencia (variables independientes) y los atributos texturales (variables dependientes). El modelo de regresión lineal de cuadrados mínimos parciales con dos factores logró explicar el 90,8 % de la variabilidad de los atributos texturales a través de los parámetros de las curvas de fluencia. El factor PLS 1 logró explicar el 88,5 % y el factor PLS 2 el 2,2%. Como la inclusión de nuevos factores al modelo no mejoraba la predicción no fueron considerados en el mismo.

El factor PLS 1 explicó el 58,6 % de las variables X y el 88,5% de las variables Y mientras que el factor PLS 2 explicó el 29,9 % de las variables X y el 2,2 % de las variables Y. Con el modelo propuesto por dos factores los atributos crujencia, dureza, fracturabilidad y cohesividad fueron los mejores explicados (75,9; 44,7; 49,6 y 47,1 % de la varianza explicada respectivamente) mientras que la jugosidad (13,4 %) fue poco explicada (**Figura 4-19**).

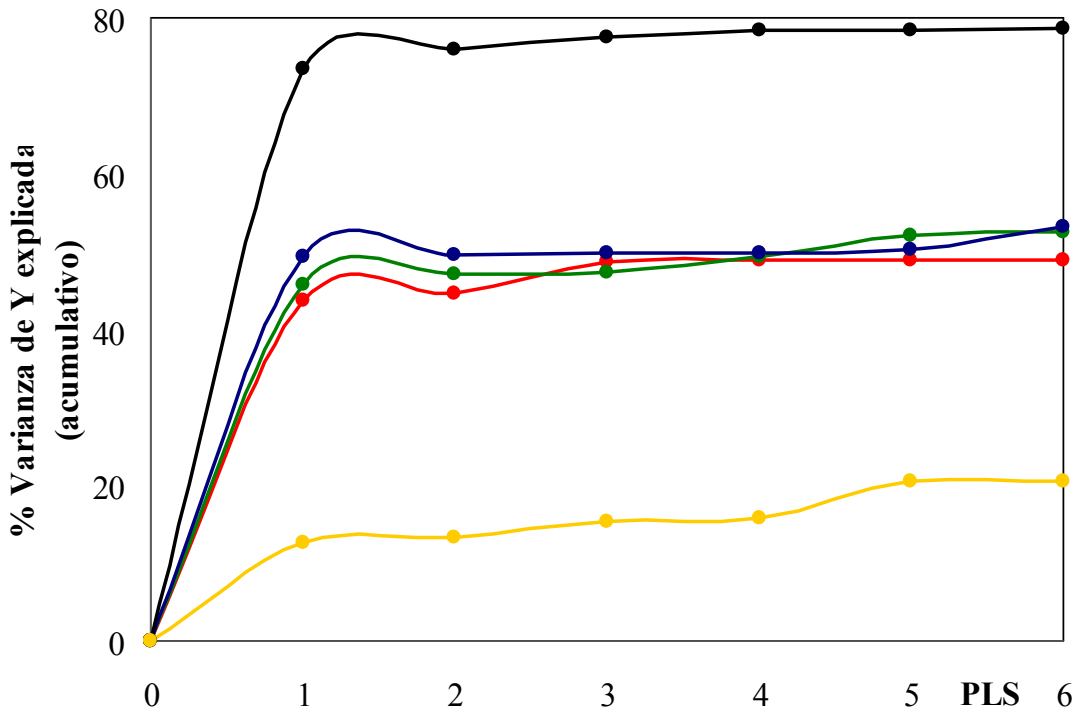


Figura 4-19. Porcentaje de varianza de los atributos sensoriales explicada por los parámetros de fluencia de tejido de manzana fresco y escaldado. (—) crujencia, (—) dureza, (—) cohesividad, (—) jugosidad, (—) fracturabilidad.

Las relaciones entre las variables sensoriales e instrumentales se observan en la **Figura 4-20**. Analizando la ubicación de las variables a través de los factores PLS 1 y PLS 2 puede notarse que los parámetros J_0, J_1 y J_2 están positivamente correlacionados con la cohesividad y negativamente correlacionados con la dureza y la crujencia; a su vez la dureza y la crujencia están negativamente correlacionadas con los parámetros η_N y λ_1.

Las manzanas escaldadas durante 150 segundos fueron ubicadas en el cuadrante negativo de la PLS 1, las escaldadas durante 90 segundos en la zona central y las manzanas frescas en el cuadrante positivo, indicando que las muestras tratadas mostraron un aumento en los parámetros J_0, J_1 y J_2 y en la cohesividad, mientras que el control se caracterizó por tener los valores más altos en dureza, crujencia, jugosidad y en los parámetros η_N y λ_1 (**Figura 4-21**).

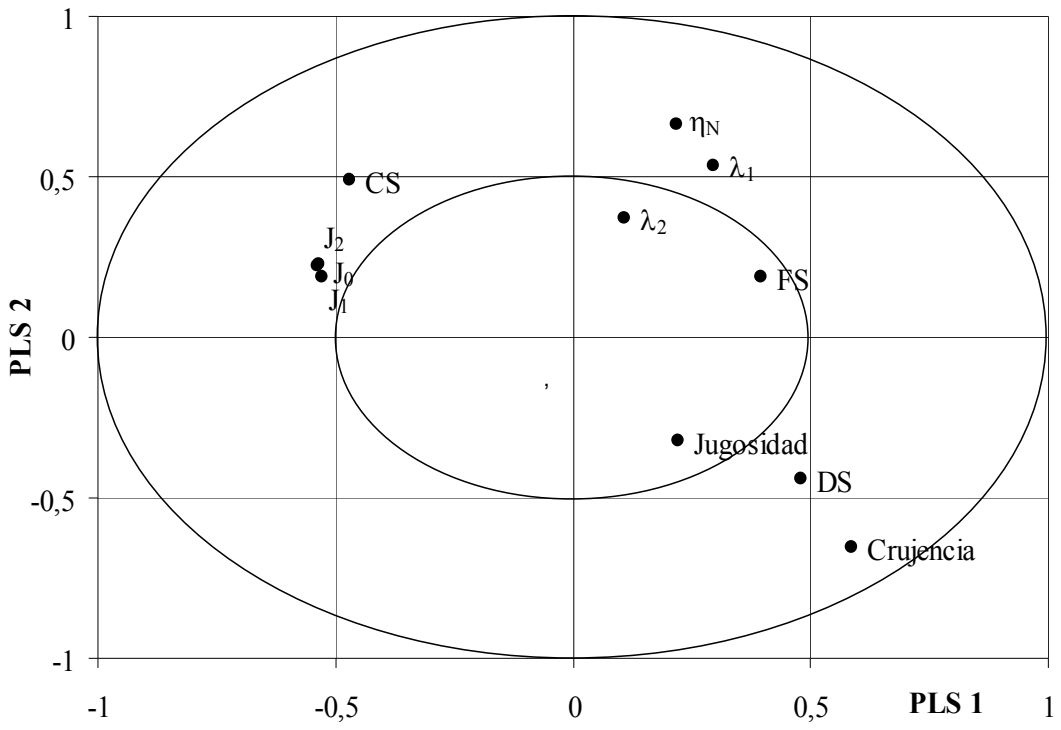


Figura 4-20. Correlación entre las variables de los ensayos de fluencia y los atributos sensoriales para el tejido de manzana fresco y escaldado 90 s y 150 s.

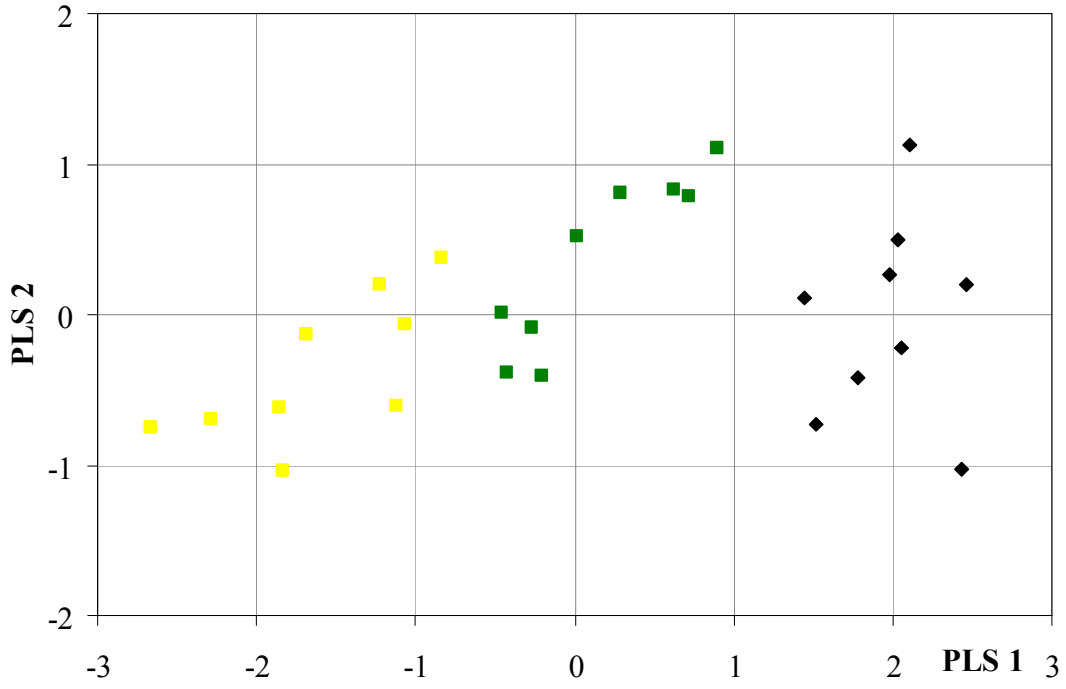


Figura 4-21. Ubicación del tejido de manzana fresco y escaldado distinto tiempo en función de la PLS 1 vs PLS 2. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (■) escaldado 150 s.

4.3.1.4. Caracterización microestructural y ultraestructural

Los cambios microestructurales producidos por el escaldado fueron evaluados mediante microscopía óptica (MO) y los cambios ultraestructurales mediante microscopía electrónica de transmisión (MET).

En las **Figuras 4-22 y 4-23** se muestran las observaciones microscópicas de tejido de manzana fresco (control) y escaldado durante 90 y 150 segundos.

En el tejido de manzana fresco, las células y los espacios intercelulares se observaron distribuidos en un arreglo no homogéneo y anisotrópico. Las células, más o menos regulares en forma, aparecieron túrgidas con una estructura celular bien definida. El volumen celular se mostró ocupado por una gran vacuola central, y el citoplasma, rodeado por el plasmalema y el tonoplasto, se presentó como una fina capa revistiendo la superficie celular. Los espacios celulares exhibieron varias formas y tamaños (**Figura 4-22-A, B**). Esta descripción del tejido fresco de manzana se corresponde con las reportadas por Gómez (2010) y Martínez y col. (2007). En las observaciones con MET se visualizaron paredes celulares con buena densidad electrónica y presencia de laminilla media, aunque en algunas áreas no se percibió la presencia de la misma (**Figura 4-23-A, B**).

El escaldado durante 90 segundos provocó disrupción de membranas (plasmalema y tonoplasto); las células aparecieron más irregulares, menos teñidas y levemente plegadas (**Figura 4-22-C, D**). En MET, las paredes celulares evidenciaron menor densidad electrónica, presencia de laminilla y leve degradación de la pared celular, como asimismo alteración de la disposición de las microfibrillas. El contenido del citoplasma se visualizó levemente separado de la pared celular observándose claramente la ruptura de membranas **(Figuras 4-23-C, D).**

Después de 150 segundos de escaldado, las membranas rotas mostraron importante fragmentación. Las paredes celulares aparecieron más angulosas por la pérdida de presión de turgor pero también se observaron muy debilitadas en algunas zonas (**Figura 4-22-E, F**). En las observaciones ultraestructurales se pudo observar leve densidad electrónica, laminilla media poco nítida y citoplasma separado e interrumpido. La diferencia de densidad electrónica de la pared celular (**Figura 4-23-E, F)** comparada con la correspondiente al control pondría de manifiesto una importante degradación de las pectinas de la pared celular provocadas por el tratamiento térmico.

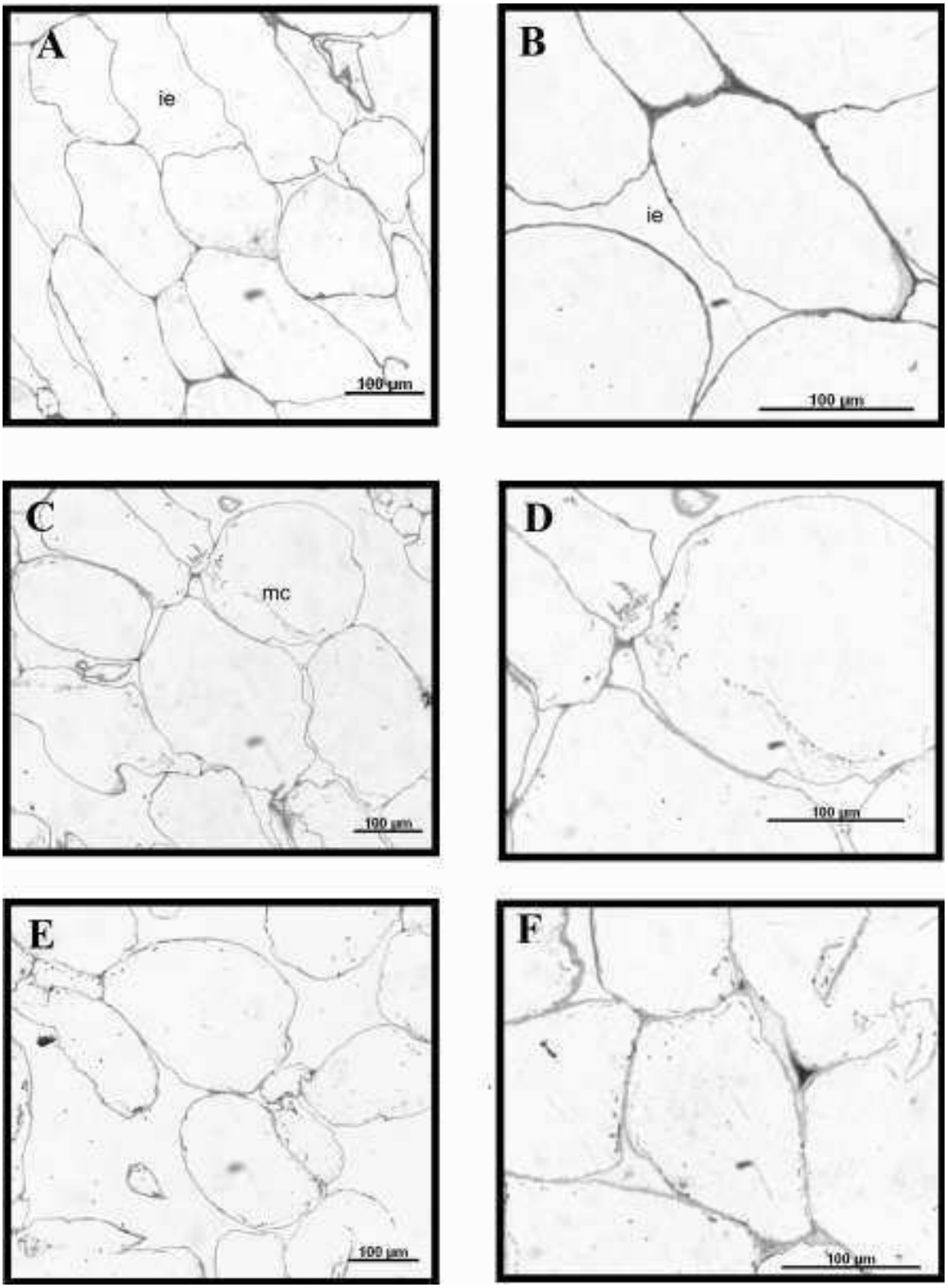


Figura 4-22. Imágenes de microscopia óptica de tejido de manzana fresco y escaldado diferentes tiempos. A, B: fresco (control); C, D: escaldado 90 s; E, F: escaldado 150 s. ie: espacio intercelular; mc: membrana celular.

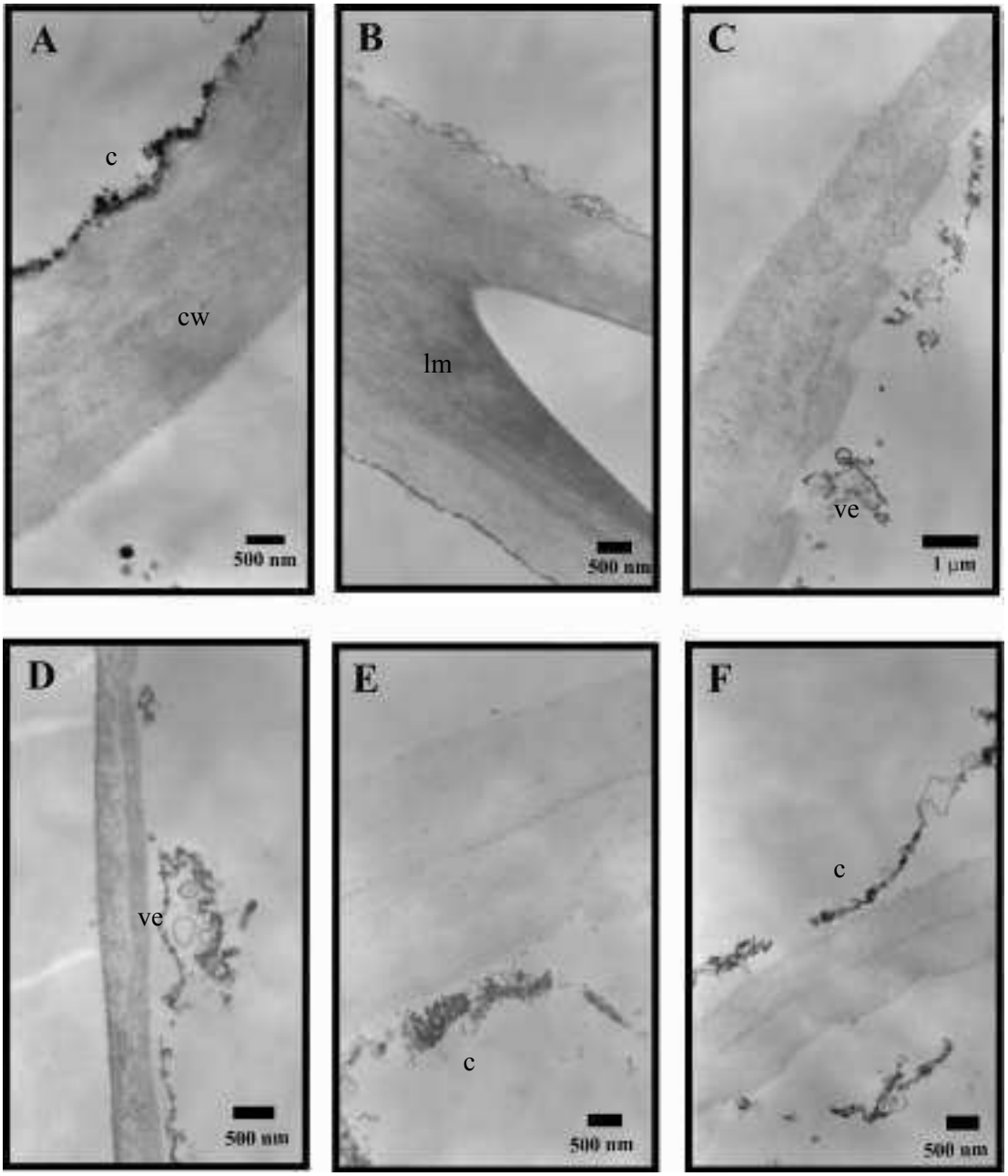


Figura 4-23. Imágenes de microscopia electrónica de transmisión de tejido de manzana fresco y escaldado diferentes tiempos. A, B: fresco (control); C, D: escaldado 90 s; E, F: escaldado 150 s. cw: pared celular, lm: laminilla media, c: citoplasma, ve: vesícula.

4.3.2. Deshidratación osmótica combinada con escaldado

Se estudió el efecto de la deshidratación osmótica a presión atmosférica en el tejido de manzana utilizando una solución acuosa de glucosa 22 % p/p para obtener un actividad de agua (a_w) final de 0,97 (DOA). Además se evaluó el tejido de manzana fresco (C), el tejido escaldado (E) y el tejido deshidratado osmóticamente con un escaldado previo de 90 segundos (DOAE). Los tratamientos en el tejido de manzana fueron realizados según lo detallado en **Materiales y Métodos sección 3.3.1**.

Para determinar el tiempo de deshidratación de los cilindros de manzana de 1 cm de espesor se tomaron muestra a intervalos de tiempo constantes durante la deshidratación osmótica con glucosa y se determinaron los sólidos solubles (ºBrix) y la a_w de cada muestra (**Tabla 4-20**).

Tabla 4-20. a_w y sólidos solubles (ºBrix) del tejido de manzana sometido a diferentes tiempos de deshidratación osmótica.

Tiempo (min)	a_w	º Brix
0	0,98	11,2 ± 0,1
60	0,98	13,9 ± 0,3
120	0,98	16,1 ± 0,2
180	0,98	17,2 ± 0,1
240	0,98	17,6 ± 0,1
300	0,97	18,6 ± 0,2
360	0,97	18,9 ± 0,6

Analizando los resultados obtenidos se observa que a partir de los 300 minutos se obtuvo la actividad de agua deseada. Se decidió osmotizar las muestras 390 minutos para asegurarse que se alcanzó la actividad de agua requerida.

En la **Tabla 4-21** se detallan los valores de actividad de agua y sólidos solubles de las muestras que fueron utilizadas para la caracterización reológica, textural y estructural de esta sección.

Tabla 4-21. Valores promedio de a_w y sólidos solubles (ºBrix) y sus correspondientes desvíos estándar de tejido de manzana fresco y osmotizado con o sin escaldado previo.

Tratamiento	º Brix	a_w	Temperatura (ºC)
C	11,5 ± 0,7	0,98 ± 0,01	20,0 ± 0,1
DOA	17,1 ± 0,1	0,96 ± 0,01	20,4 ± 0,2
E+DOA	19,0 ± 0,5	0,96 ± 0,01	20,9 ± 0,1

4.3.2.1. Propiedades reológicas

- **Ensayos oscilatorios**

Para realizar los barridos de frecuencia con control de la deformación de cizalla (BF CDC) se determinó previamente el rango viscoelástico lineal (RVL) de las muestras mediante un barrido de amplitud con control de la deformación de cizalla (BA CDC). Este último se realizó para deformaciones entre 0,001% y 10% utilizando una frecuencia constante (ω) de 10 s^{-1}. El valor del RVL límite para las muestras fue de 0,0095 % para el control, 0,06% para las muestras escaldadas, 0,07% para las muestras osmotizadas y 0,08 para las muestras osmotizadas con escaldado previo (**Figura 4-24**). El efecto de la deshidratación osmótica (con o sin escaldado) produjo un RVL mayor. Ello coincidió con los resultados de Martínez (2005) comentados ya en la sección anterior.

Los ensayos de barrido de frecuencia (BF CDC) se determinaron para valores de frecuencia entre 100 s^{-1} hasta 0,1 s^{-1}, dentro del RVL recomendado por el software del equipo para las muestras frescas (0,005 %). Se utilizó este último para asegurar que todas las muestras evaluadas estuvieran dentro de los límites de linealidad.

El espectro mecánico obtenido para las muestras tratadas y el control se observa en la **Figura 4-25**. Para todas las muestras, los módulos de almacenamiento (G') excedieron a los valores de los módulos de pérdida (G'') a lo largo de todo el rango de frecuencia, indicando un comportamiento sólido predominante. Las muestras tratadas presentaron menores valores en el módulo de pérdida y en el de almacenamiento en todo el rango de frecuencia.

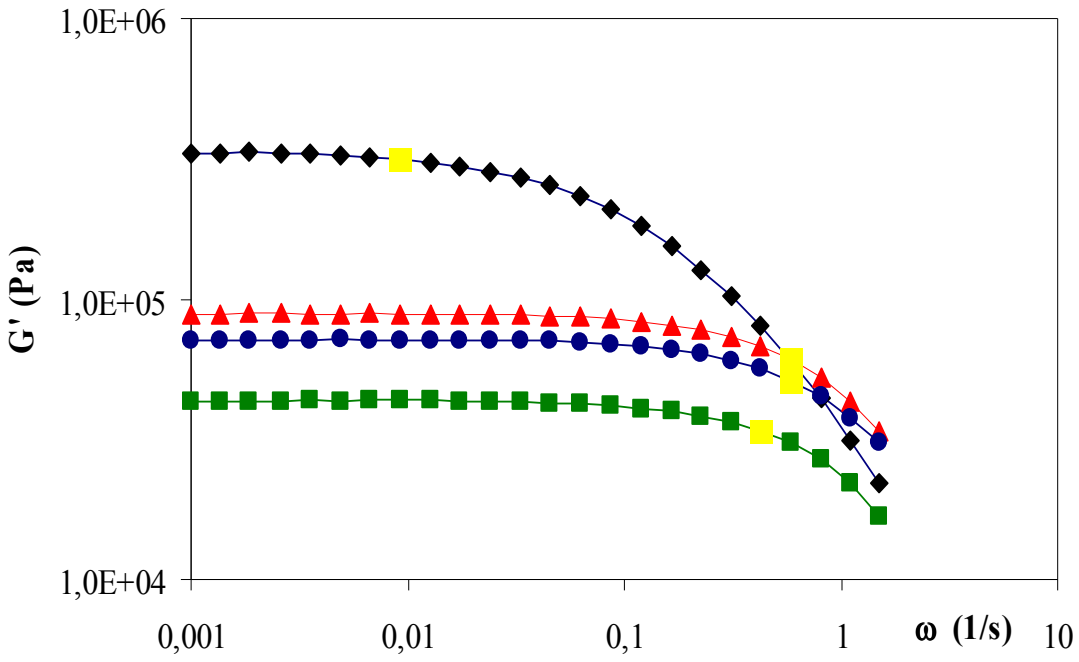


Figura 4-24. Barrido de amplitud con control de la deformación de cizalla de tejido manzana fresco, escaldado y osmotizado con y sin escaldado previo. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (▲) osmotizado, (●) escaldado + osmotizado. (■) valor límite recomendado de RVL.

Los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G") variaron con la frecuencia angular. La dependencia del módulo de almacenamiento fue directamente proporcional a la frecuencia angular. Se evaluó la existencia de diferencias significativas en el módulo de almacenamiento para los espectros de las muestras tratadas y control (**Tabla 4-22**). El análisis de las curvas se realizó según lo detallado en **Materiales y Métodos sección 3.10** (Costell y Duran, 1978).

Evaluando los resultados obtenidos del análisis se encontraron diferencias significativas entre el control y las muestras tratadas (E, DOA y E+DOA) y entre las muestras tratadas DOA y E; y E+DOA y E. No se encontraron diferencias significativas entre DOA y E+DOA. La disminución de G' en las muestras tratadas indicaría una pérdida del carácter elástico, siendo más marcado en las muestras E. El efecto del escaldado fue ya analizado en la sección anterior (sección **Resultados 4.3.1**), pero como se utilizaron lotes diferentes y dada la variabilidad biológica de la fruta, se volvieron a evaluar la muestra control y la escaldada 90 s.

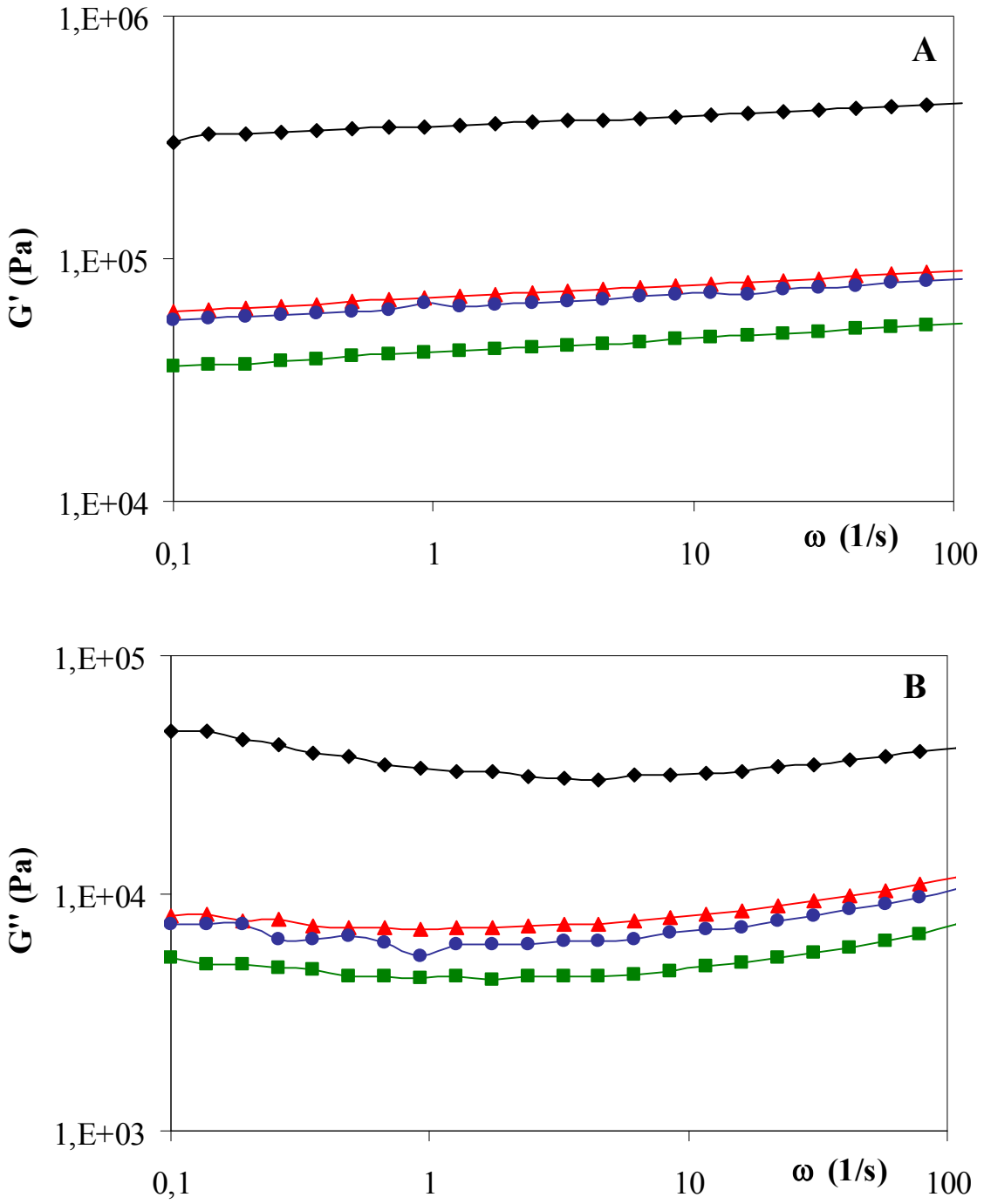


Figura 4-25. Barrido de frecuencia a γ = 0,005% en función de la frecuencia angular (ω = 100 – 0.1 s^{-1}) de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo. A) módulo de almacenamiento (G'), B) módulo de pérdida (G''). (♦) control, (■) escaldado 90 s, (▲) osmotizado, (●) escaldado + osmotiza

Tabla 4-22. Resumen del análisis de varianza de los parámetros de regresión de las curvas de G' de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo).

Origen de la varianza	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio del error	Fisher
C	3,7	238	0,015	
E	0,31	238	0,0013	
DOA	0,41	238	0,0017	
E+DOAE	1,92	238	0,008	
C+E	103,4	478	0,21	
Σ (C+E)	4,01	476	0,008	5898***
Δ [(C+E)- Σ (C+E)]	99,4	2	49,7	
C+DOA	60,8	478	0,13	
Σ (C+DOA)	4,12	476	0,0086	3281***
Δ [(C+DOA)- Σ (C+DOA)]	56,7	2	28,33	
C+(E+DOA)	69,7	478	0,15	
Σ (C+(E+DOA))	5,62	476	0,012	
Δ [(C+(E+DOA))- Σ (C+(E+DOA))]	64,1	2	32,1	2715***
E+DOA	6,68	478	0,014	
Σ (C+(E+DOA))	0,72	476	0,0015	
Δ [(C+(E+DOA))- Σ (C+(E+DOA))]	5,96	2	2,98	1970***
E+(E+DOA)	6,1	478	0,013	
Σ (E+(E+DOA))	2,23	476	0,0046	
Δ [(E+(E+DOA))- Σ (E+(E+DOA))]	3,85	2	1,92	410,9***
DOA+(E+DOA)	2,56	478	0,005	
Σ (DOA+(E+DOA))	2,33	476	0,005	
Δ [(DOA+(E+DOA))- Σ (DOA+(E+DOA))]	0,23	2	0,12	23,5(NS)

C+E1 = Ajuste de Control +E1; Σ= suma (ajuste C + ajuste E1);
Δ = Diferencia (ajuste de C+ E1 – Σ); ***1% nivel de significación; NS: no significativo.

Las curvas de G" no se pudieron ajustar a ningún modelo. En todas las muestras el comportamiento en función de la frecuencia angular fue similar. A bajas frecuencias (0,1-1%) G" disminuyó, permaneció sin variación a frecuencias entre 1-10 %, y a frecuencias más altas (10-100%) presentó un aumento gradual. En general, el factor de pérdida (tan δ = G"/G') no fue un parámetro adecuado para distinguir diferencias en las propiedades viscoelásticas de las diferentes muestras, especialmente a frecuencias bajas (0,1-1 %), en donde la contribución relativa de las componentes viscosa y elástica no varió por los tratamientos. Para frecuencias entre (1-100%) se observó un aumento para las muestras tratadas (**Figura 4-26**).

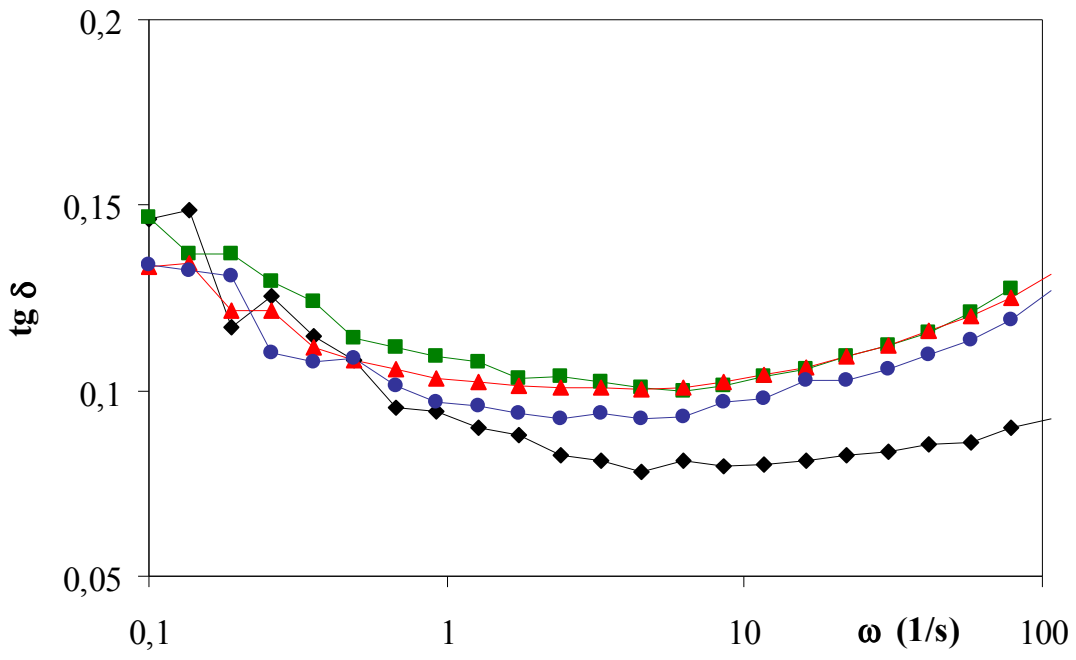


Figura 4-26. Factor de pérdida (tg δ) en función de la frecuencia angular (ω=100 – 0,1 s^{-1}) de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (▲) osmotizado, (●) escaldado + osmotizado.

- **Ensayo de fluencia – recuperación**

Para determinar el esfuerzo a aplicar en el ensayo se realizó un barrido de amplitud con control del esfuerzo de cizalla (BA CEC). El RVL recomendado por el software del equipo fue de 50 Pa (**Figura 4-27**). Evaluando los resultados se decidió utilizar un esfuerzo de 35 Pa, valor en el cual todas las muestras se encuentran dentro del rango viscoelástico lineal.

Las curvas experimentales promedio de deformación vs tiempo para las muestras tratadas y control se observan en la **Figura 4-28.** El efecto de la deshidratación osmótica como único tratamiento o combinada con escaldado provocó una mayor deformación de los tejidos de manzana. En la **Figura 4-29** se observa el comportamiento de curvas de capacitancia modeladas promedio. Estas últimas se ajustaron al modelo de Kelvin Voigt generalizado (ecuación 3-5) obteniéndose coeficientes de correlación > 0,99.

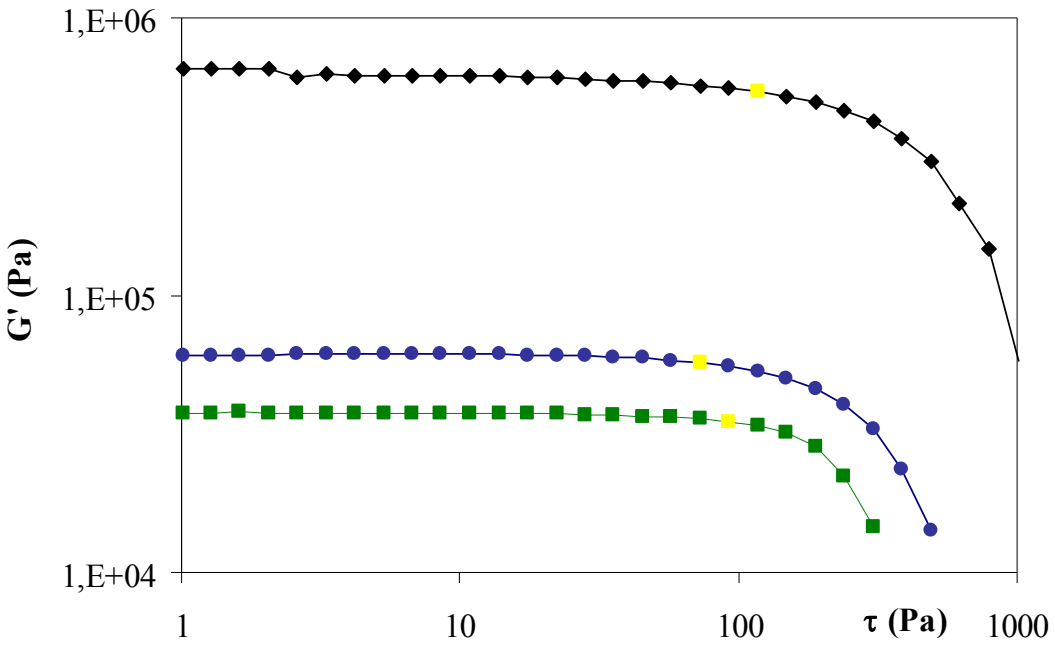


Figura 4-27. Barrido de amplitud con control del esfuerzo de cizalla para tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (●) escaldado + osmotizado. (■) valor límite recomendado del RVL.

Los parámetros obtenidos del modelo utilizado (J_0, J_1, J_2, λ_1, λ_2 y η_N) se muestran en la **Tabla 4-23.** Evaluando los parámetros a través de una análisis de varianza multivariado se encontraron diferencias significativas ($F_{18,135}$ = 8,98; p<0,0001) entre las muestras osmotizadas (con y sin escaldado previo) con respecto al control, y entre las muestras únicamente osmotizadas con respecto a las muestras osmotizadas con escaldado previo. No se encontraron diferencias significativas entre las muestras escaldadas y las osmotizadas con tratamiento térmico previo.

La capacitancia instantánea (J_0) y las capacitancias de retardo (J_1 y J_2) para las muestras osmotizadas y escaldadas se incrementaron, indicando ello una disminución en el módulo elástico instantáneo ($E_0 = 1/J_0$). La capacitancia viscosa ($1/\eta_N$) de las muestras tratadas aumentó con respecto a la del tejido fresco. El tiempo de retardo λ_1 para las muestras tratadas decreció levemente con respecto al control, mientras que λ_2 fue similar para todos las muestras Los aumentos observados en general fueron más marcados en las muestras tratadas térmicamente.

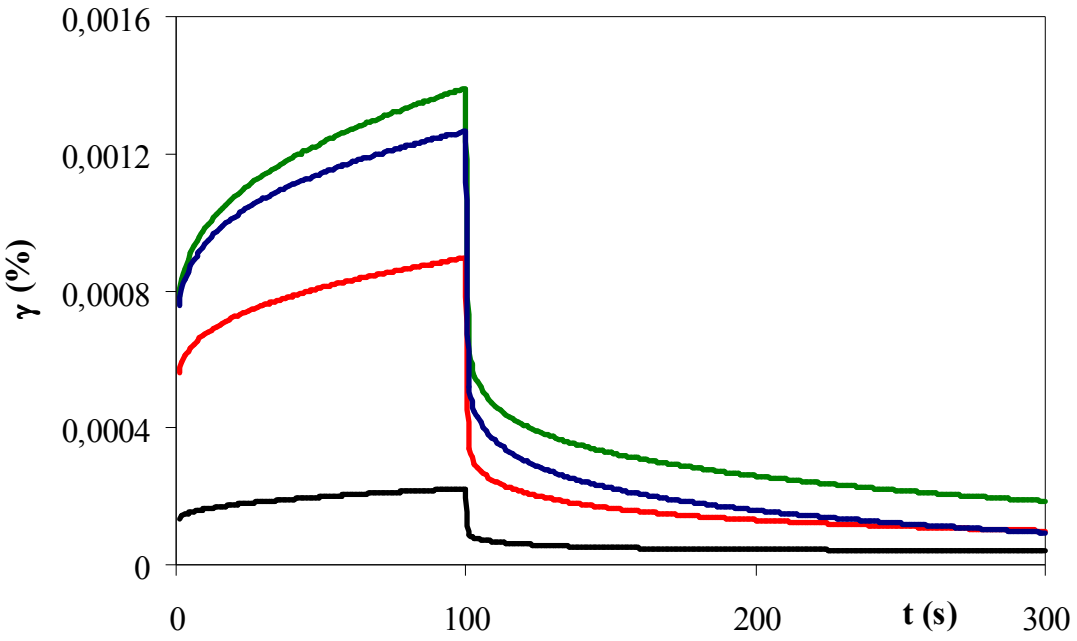


Figura 4-28. Curvas promedio de fluencia – recuperación de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo. (—) control, (—) escaldado 90 s, (—) osmotizado, (—) escaldado + osmotizado.

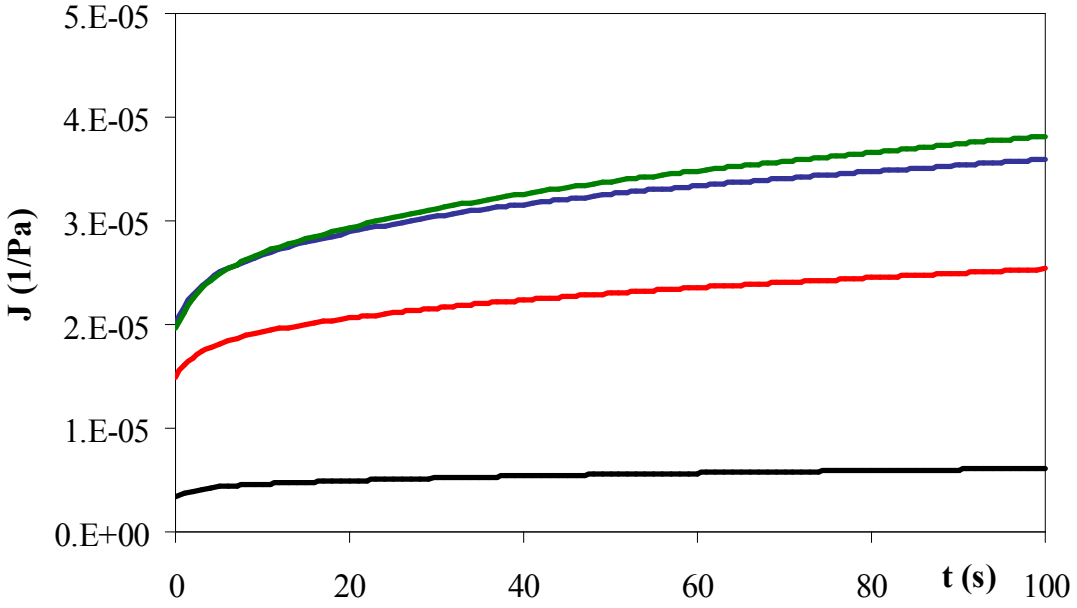


Figura 4-29. Curvas promedio de capacitancia (etapa de fluencia) para el tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo. (—) control, (—) escaldado 90 s, (—) osmotizado, (—) escaldado + osmotizado.

Tabla 4-23. Parámetros promedio y su correspondiente desviación estándar de las curvas de fluencia* de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo.

Tratamiento	J_0 (1/Pa) ($x10^5$)	J_1(1/Pa) ($x10^5$)	J_2(1/Pa) ($x10^5$)	λ_1(s)	λ_2 (s)	η_N(Pa.s) ($x10^{-7}$)	
C	0,36 ±0,14 54,9**	0,11±0,05 16,8**	0,06± 0,03 10,9**	26,8± 7,5	2,29± 0,76	9,4 ± 3,9 14,6**	a
E	2,1± 0,4 51,3**	0,71± 0,13 18,7**	0,41± 0,06 10,9**	23,7± 2,7	2,7 ± 0,3	1,42 ± 0,38 18,9**	b
DOA	1,4 ± 0,2 59,1**	0,35 ± 0.13 15,1**	0,24± 0,05 10,2**	22,5 ± 2,5	2,39 ± 0,24	2,7 ± 0,5 15,6**	c
E+DOA	2,1± 0,4 55,6**	0,7 ± 0,1 18,1**	0,41 ± 0,06 10,7**	23,8 ±2,7	2,67 ± 0,29	1,69 ± 0,25 15,5**	b

* Parámetros obtenidos a partir de la ecuación 3-5.
** Contribución relativa de cada tipo de capacitancia a la capacitancia total al final de la etapa de fluencia.
Tratamientos con igual letra no presentan diferencias significativas con un 95 % de nivel de confianza.

La deshidratación osmótica en tejido de manzana produjo una pérdida de elasticidad y rigidez, y un aumento en la fluidez del tejido. El escaldado previo en las muestras deshidratadas provocó una significativa modificación en las características de fluencia, las que no fueron significativamente alteradas por la deshidratación osmótica posterior.

La contribución relativa de cada capacitancia a la capacitancia total, para el tejido de manzana fresco y tratado, se encontró dentro de los siguientes rangos: 59 – 51 % para J_0; 18,7 – 15,1 % para J_1; 10,9 – 10,2 % para J_2 y 18,9 – 14,6 % para $1/\eta_N$. La mayor contribución estuvo dada por la capacitancia instantánea (J_0) en todos los casos estudiados, siendo la contribución de la capacitancia J_2 similar en todas las muestras.

El aumento de la capacitancia al final de la fase de fluencia de las muestras osmotizadas con o sin escaldado previo fue de 620% y 400% respectivamente en comparación con la muestra fresca, siendo el primer valor similar al determinado para la muestra escaldada 90 s en la sección anterior (600%).

El análisis de componentes principales (PCA) indicó que la componente principal 1 explicó el 85,9% de la variabilidad de los datos, e incluyendo la componente principal 2 (CP 2) fue posible explicar el 97,6% (**Tabla 4-24**). Las **Tablas 4-25 y 4-26** muestran el

peso de las variables sobre cada componente. La CP 1 fue asociada positivamente con la capacitancia instantánea (J_0) y las capacitancias de retardo (J_1 y J_2) y negativamente por el coeficiente de viscosidad (η_N). La CP 2 (11,7 %) fue representada positivamente por los tiempos de retardo (λ_1 y λ_2).

Analizando el gráfico obtenido del PCA (**Figura 4-30**) puede verse claramente cómo la deshidratación osmótica afectó las propiedades viscoelásticas del tejido de manzana. Las muestras tratadas térmicamente (E y E+DOA) fueron colocadas en el cuadrante positivo de la CP 1 y el control en el cuadrante negativo. Analizando la relación entre las muestras y los parámetros presentes en el cuadrante se observó que la deshidratación osmótica provocó un aumento en las capacitancias (J_0, J_1 y J_2) y una disminución en el coeficiente viscoso (η_N).

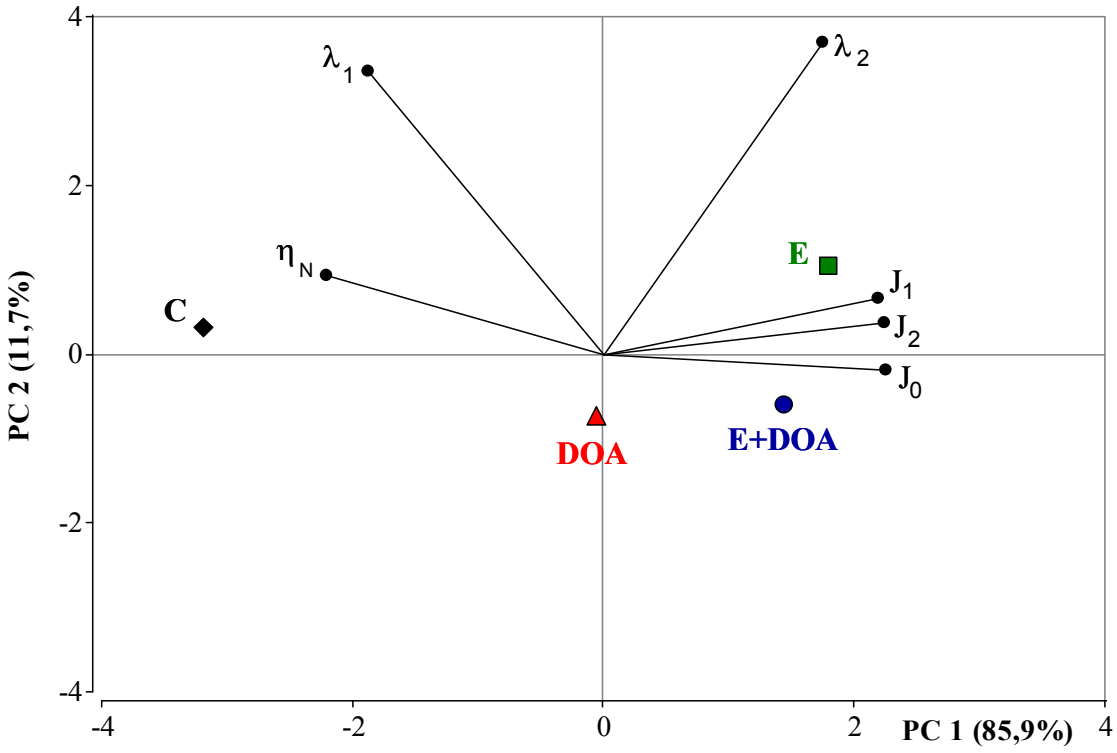


Figura 4-30. Análisis de componentes principales para los parámetros de las curvas de capacitancia de la fase de fluencia para el tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (▲) osmotizado, (●) escaldado + osmotizado.

Tabla 4-24, 4-25 y 4-26. Autovalores, autovectores y correlaciones correspondientes al PCA de los parámetros de la curva de capacitancia de la fase de fluencia para el tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo.

Autovalores			
PC	Valor	Proporción	Prop. Acum.
1	5,15	0,86	0,86
2	0,7	0,12	0,98
3	0	0,02	1

Autovectores		
Variables	PC1	PC2
J_0	0,44	-0,04
J_1	0,43	0,13
J_2	0,44	0,07
λ_1	-0,36	0,65
λ_2	0,34	0,72
η_N	-0,43	0,18

Correlaciones con las variables originales		
Variables	CP 1	CP 2
J_0	1	-0,03
J_1	0,97	0,11
J_2	0,99	0,06
λ_1	-0,83	0,55
λ_2	0,77	0,6
η_N	-0,98	0,15

Valor en rojo representa la variable(s) más relevante(s) de la componente principal.

- **Ensayos de doble compresión**

El Perfil de Textura instrumental para las muestras osmotizadas y fresca (control) se observa en la **Figura 4-31**. Las curvas para las muestras control y osmotizadas presentaron un pico abrupto al comienzo del ensayo (precedido en el caso del control por un pico más pequeño) y uno más leve al final de la primera compresión, por lo tanto ambas muestras se caracterizaron como duras y fracturables. La manzana fresca presentó un incremento abrupto de la fuerza con el tiempo mientras que en las muestras tratadas el incremento fue más gradual (ligera concavidad de las curvas). Analizando las muestras tratadas térmicamente, se observa que las que fueron deshidratadas posteriormente presentaron un pico nítido al comienzo del ensayo, pero el tratamiento combinado con el escaldado produjo una disminución de la dureza y una pérdida de la fracturabilidad, necesitándose una menor fuerza para obtener la misma deformación.

En la **Tabla 4-27** se encuentran los parámetros de cada muestra obtenidos a partir de las curvas fuerza-tiempo.

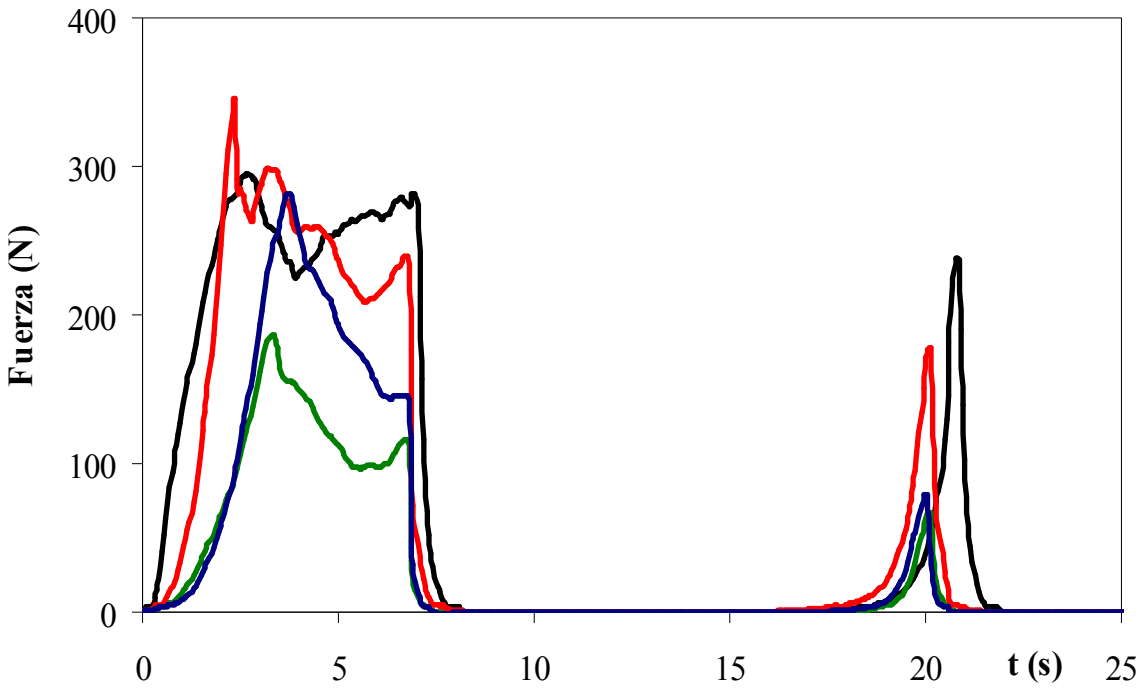


Figura 4-31. Curvas típicas de doble compresión para el tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo. (—) control, (—) escaldado 90 s, (—) osmotizado, (—) escaldado + osmotizado.

Analizando los parámetros mecánicos de las muestras se encontraron diferencias significativas ($F_{30,207}$ = 121; p<0,0001) entre el tejido fresco de manzana y los tejidos deshidratados osmóticamente. Todos los tratamientos presentaron diferencias significativas entre ellos. Para los tejidos deshidratados sin escaldado previo se observó un leve aumento de la dureza y la fracturabilidad. En el resto de los parámetros mecánicos se observó una disminución. En las muestras deshidratadas con tratamiento térmico se encontró una disminución en todos los parámetros mecánicos incluyendo la dureza y una pérdida total de la fracturabilidad con respecto al control (manzana fresca). Pero si la muestra E+DOA se compara con la muestra E (su control), puede concluirse que la deshidratación osmótica produjo alguna modificación en la estructura, que se vio reflejada en un aumento de las propiedades mecánicas.

El módulo de deformabilidad disminuyó considerablemente para los tejidos tratados (E, DOA y E+DOA) mostrando una pérdida de la rigidez.

Tabla 4-27. Parámetros promedio y su correspondiente desviación estándar de las curvas de doble compresión de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo.

Tratamiento	Fracturabilidad (N)	Dureza (N)	Dureza 2 (N)	Área 1 (J)	Área 2 (J)	Elasticidad (-)	Cohesividad (-)	Gomosidad (N)	Masticabilidad (N)	E_d (N/mm^2)	
C	287,9 ± 31,1	293,2 ± 30,3	225 ± 20	1,39 ± 0,13	0,11 ± 0,01	0,55 ± 0,06	0,081 ± 0,01	23,9 ± 3,3	13,2 ± 2,9	1,92 ± 0,53	a
E	196,2 ± 24,5	196,2 ± 24,5	80.4 ± 9.3	0,7 ± 0,1	0,03 ± 0,01	0,33 ± 0,03	0,04 ± 0,01	8 ± 1	2,7 ± 0,5	0,11 ± 0,02	b
DOA	337 ± 30	337 ± 30	187,4 ± 22,7	1,31 ± 0,13	0,08 ± 0,01	0,53 ± 0,06	0,06 ± 0,01	21,4 ± 2,6	11,4 ± 2,5	0,17 ± 0,03	c
E+DOA	No detectado	288,4 ± 25,2	92,6 ± 14,1	0,74 ± 0,12	0.04 ± 0.01	0,41 ± 0,05	0,05 ± 0,01	12,8 ± 2,1	5,3 ± 1,3	0,09 ± 0,02	d

Tratamientos con igual letra no presentan diferencias significativas con un 95 % de nivel de confianza.

Los resultados obtenidos se corroboraron parcialmente con lo reportado en la literatura. Castelló y col. (2009) encontraron una disminución en la dureza, el módulo de deformabilidad y el área bajo la curva de la primera compresión en manzanas osmotizadas (var. Granny Smith) con glucosa a presión atmosférica. Khin y col. (2007) observaron en manzanas (var. Fuji) deshidratadas osmóticamente con sacarosa (61,5 % p/v) un decrecimiento en la fracturabilidad, dureza y elasticidad.

El análisis de componentes principales de los parámetros mecánicos (**Figura 4-32**) explicó el 93,8% de la variabilidad de los datos con las dos primeras componentes principales. La CP 1 explicó el 89 % y fue representada positivamente por la fracturabilidad, la dureza en la segunda compresión, el área bajo la curva en la primera compresión, el área bajo la curva en la segunda compresión, la cohesividad, la elasticidad, la gomosidad y la masticabilidad. La CP 2 explicó el 9,8% y fue definida positivamente por la dureza en la primera compresión y negativamente por el módulo de deformabilidad (**Tablas 4-28, 4-29 y 4-30)**. Estudiando la ubicación de las muestras en el gráfico se observa que el tejido de manzana osmotizado con escaldado previo (E+DOA) fue ubicado en el cuadrante negativo de la CP1 y en el cuadrante positivo de la CP 2. Sus parámetros texturales sufrieron una disminución importante comparados con los del control. La muestra osmotizada (DOA) se ubicó en el cuadrante positivo de la CP 1 y en el positivo de la CP 2 indicando que sus parámetros, exceptuando la dureza que aumentó ligeramente, sufrieron una leve disminución debido al efecto del tratamiento. Por último, la muestra escaldada fue ubicada en el cuadrante negativo de la CP 1 y la CP 2. Comparando las muestras tratadas térmicamente, la deshidratación osmótica produjo un aumento en los parámetros texturales, excepto en el módulo de deformabilidad que se mantuvo similar a del tejido escaldado.

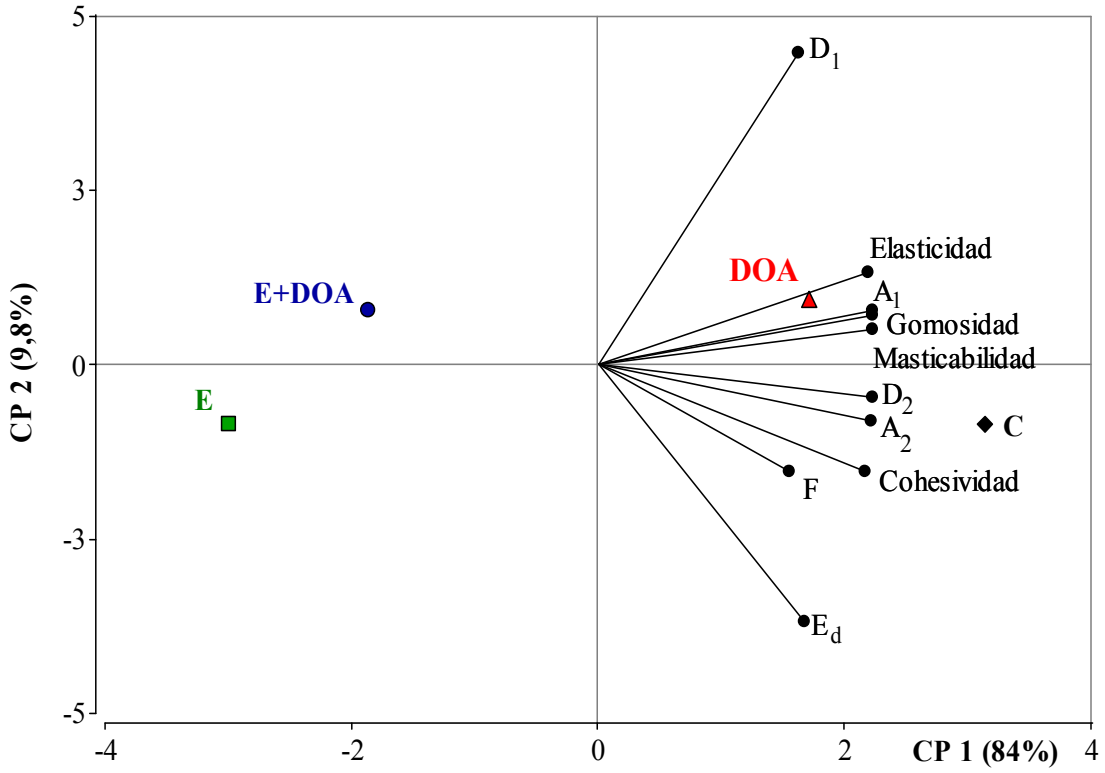


Figura 4-32. Análisis de componentes principales para los parámetros de las curvas de doble compresión de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (▲) osmotizado, (●) escaldado + osmotizado.

Tabla 4-28, 4-29 y 4-30. Autovalores, autovectores y correlaciones correspondiente al PCA de los parámetros mecánicos para el tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo.

Autovalores			
CP	Valor	Proporción	Prop. Acum.
1	8,4	0,84	0,84
2	0,98	0,1	0,94

Autovectores		
Variables	CP1	CP2
Fracturabilidad (F)	0,24	-0,24
Dureza (D_1)	0,25	0,69
Dureza 2 (D_2)	0,34	-0,07
Area 1 (A_1)	0,34	0,12
Area (A_2)	0,34	-0,12
Elasticidad	0,34	0,2
Cohesividad	0,33	-0,23
Gomosidad	0,34	0,11
E_d	0,26	-0,57
Masticabilidad	0,34	0,08

Correlaciones con las variables originales		
Variables	CP 1	CP 2
Fracturabilidad (F)	0,69	-0,23
Dureza (D_1)	0,73	0,68
Dureza 2 (D_2)	1	-0,07
Area 1 (A_1)	0,99	0,12
Area (A_2)	0,99	-0,12
Elasticidad	0,98	0,2
Cohesividad	0,97	-0,23
Gomosidad	0,99	0,11
E_d	0,75	-0,56
Masticabilidad	1	0,08

Valor en rojo representa la variable(s) más relevante(s) de la componente principal.

4.3.2.2. Análisis sensorial

Se evaluaron los cambios sensoriales producidos por los diferentes tratamientos en las rodajas de manzana. A través de un panel entrenado se determinó la textura oral y con un grupo de consumidores se evaluó la diferencia global entre las muestras.

4.3.2.2.1. Análisis del perfil de textura

Se determinó la textura oral en las muestras osmotizadas con o sin escaldado previo. Se evaluaron los atributos dureza, fracturabilidad, cohesividad, crujencia, jugosidad y adhesividad al paladar. Este último atributo no se tuvo luego en cuenta ya que los evaluadores determinaron que las muestras no presentaban dicha propiedad textural.

En la **Tabla 4-31** se detallan los resultados obtenidos para cada atributo durante la evaluación.

Se encontraron diferencias significativas ($F_{3,12}$=5,52; p = 0,006) en la dureza sensorial entre el control y las muestras tratadas térmicamente (E y E+DOA). No se encontraron diferencias significativas entre el control y la muestra osmotizada (DOA) y entre el tejido escaldado y el tejido osmotizado con escaldado previo (E+DOA). Los evaluadores percibieron menor dureza en las muestras tratadas, siendo más relevante la disminución en las muestras escaldadas. El factor "evaluadores" no mostró diferencias significativas ($F_{4,20}$=1,99; p=0,16) indicando la consistencia del panel en las evaluaciones.

Tabla 4-31. Parámetros texturales promedio y su correspondiente desviación estándar obtenidos del análisis sensorial del tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo.

Tratamiento	Dureza	Fracturabilidad	Cohesividad	Crujencia	Jugosidad
C	7,92±0,98[a]	6,39±2,91[a]	2,33±1,85[a]	7,52±0,06[a]	6,02±0,29[a]
E	6,56±0,69[b]	5,41±1,73[b]	2,86±1,41[a]	5,22±0,7[b]	5,11±0,42[b]
DOA	7,07±1,19[ab]	5,78±2,08[ab]	1,89±1,01[a]	6,66±0,45[a]	5,06±0,41[b]
E+DOA	6,27±0,85[b]	4,71±2,49[bc]	2,54±1,48[a]	5,58±0,63[c]	4,49±0,28[c]

Medias de una misma columna con igual letra no presentan diferencias significativas con un 95 % de nivel de confianza.

La fracturabilidad sensorial presentó el mismo comportamiento que la dureza sensorial, es decir, una disminución significativa ($F_{3,24}$=12,51; p<0,0001) en las muestras tratadas térmicamente con respecto al control. No se encontraron diferencias entre las muestras tratadas térmicamente. Se observó una gran dificultad entre los panelistas para evaluar dicho parámetro en este tipo de muestras, por ende los juicios emitidos no fueron homogéneos ($F_{8,24}$=52,13; p<0,0001) pero todos los evaluadores percibieron a las muestras tratadas como "menos fracturables". Thybo y Martens (1998) también reportaron que los evaluadores entrenados utilizando el método del Perfil de Textura presentaron dificultad para detectar diferencias en la dureza y fracturabilidad oral de papas cocidas.

La cohesividad sensorial no presentó diferencias significativas ($F_{3,15}$ = 1,63; p = 0,2) entre el tejido fresco y los tratados. Sin embargo, las muestras tratadas térmicamente (E y E+DOA) mostraron un leve aumento (mayor deformación antes de la ruptura) en la cohesividad asociado al tratamiento. No se encontraron diferencias significativas entre los panelistas ($F_{5,15}$=1,73; p=0,16).

La crujencia disminuyó significativamente ($F_{3,12}$=82,5; p<0,0001) para las muestras escaldadas y osmotizadas con escaldado previo con respecto al control. Se encontraron además diferencias significativas entre las muestras tratadas térmicamente (E y E+DOA). Una leve disminución (no significativa) fue registrada para las muestras osmotizadas (DOA). La deshidratación osmótica provocó una pérdida de la crujencia siendo ésta muy relevante en las muestras con escaldado previo. El panel fue consistente y homogéneo en sus juicios ($F_{4,12}$ =2,66; p=0,06).

La jugosidad de los tejidos tratados se modificó significativamente ($F_{3,24}$=73,7; p<0,0001) con respecto al control. Se encontraron diferencias significativas entre las muestras osmotizadas con o sin escaldado previo (DOA y E+DOA) y entre los tejidos tratados térmicamente (E y E+DOA). No se encontraron diferencias significativas ($F_{8,24}$=2,19; p= 0,051) entre los evaluadores.

Harker y col. (2006) observaron que el jugo liberado en las manzanas depende del mecanismo de separación que se provoca entre las células y que varía entre manzanas firmes y blandas. Ellos reportaron que en manzanas firmes (control y DOA), la fractura del tejido esta asociado con una ruptura de las células liberando los fluidos del citoplasma. En cambio, en tejido de manzana blando (E y E+DOA) se produce un pérdida de adherencia entre las células. Las células en este estado no siempre liberan su contenido resultando en una manzana arenosa. Estos resultados se corroboran con los de esta tesis debido a que se observó un decrecimiento en la jugosidad acompañado por una disminución de la dureza del tejido de manzana tratado térmicamente.

Chauvin y col. (2010) reportaron cambios significativos en crujencia, dureza, fracturabilidad y jugosidad en manzanas que presentaban valores altos, intermedios y bajos de firmeza. Estos resultados se corroboraron con los resultados obtenidos en la tesis. Las muestras C y DOA que mostraron altos valores de dureza instrumental presentaron altos valores en dureza sensorial, fracturabilidad sensorial, crujencia y jugosidad, mientras que los valores más bajos fueron observados en las tejidos tratados con vapor (E y E+DOA) que presentaron valores más bajos en la dureza instrumental.

En la **Figura 4-33** se observa el Perfil de Textural sensorial obtenido para la muestras control y osmotizadas (con y sin escaldado) pudiendo observarse que las muestras osmotizadas (DOA) y escaldadas (E) fueron levemente menos duras, fracturables y jugosas. Se observó una diferencia entre ellas en la crujencia y la cohesividad indicando que el tratamiento térmico provocó una disminución relevante en la crujencia y un ablandamiento en los tejidos reflejado en un aumento en la cohesividad. La muestra osmotizada con escaldado previo (E+DOA) se observó menos dura, fracturable, crujiente y jugosa, y más cohesiva que la muestra sólo deshidratada osmóticamente. Este comportamiento era de esperase por ser la combinación de los dos anteriores.

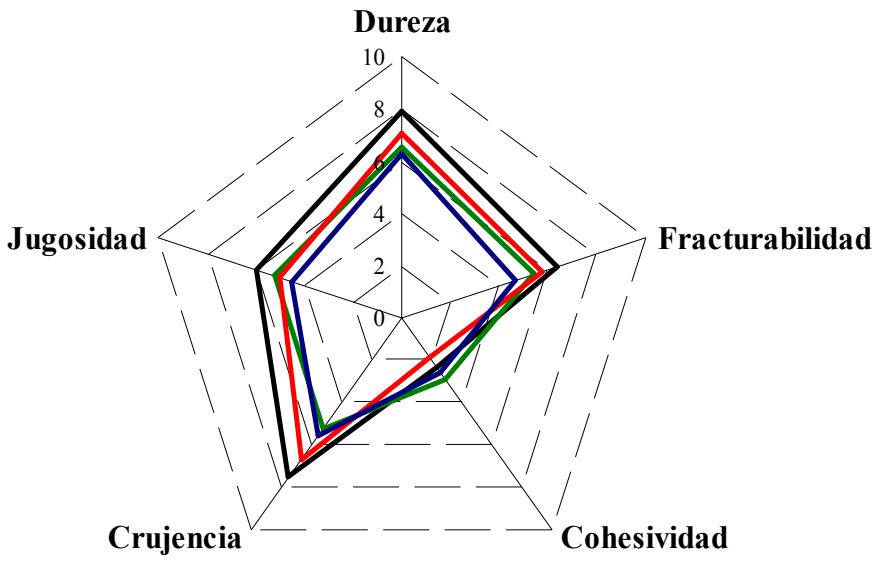


Figura 4-33. Perfil de Textura para el tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado). (▬) control, (▬) escaldado 90 s, (▬) osmotizado, (▬) escaldado + osmotizado.

4.3.2.2.2. Prueba de diferencia contra control

Los consumidores evaluaron la magnitud de la diferencia global entre las distintas muestras de manzana según se detalla en **Materiales y Métodos sección 3.7.2.** Para esta prueba no se tuvo en cuenta a la manzana fresca debido a la gran diferencia que presentaba con las muestras tratadas y porque se buscaba estudiar las diferencias entre los tratamientos.

Como control se utilizó la muestra escaldada durante 90 segundos (C) y los sistemas comparados con el control fueron:

- Control camuflado (E)
- Manzana osmotizada a presión atmosférica (DOA)
- Manzana escaldada y luego osmotizada a presión atmosférica (E+DOA)

Con los resultados obtenidos a partir de la escala numérica y verbal de categorías (desde 1: sin diferencia y 7: extremada diferencia), se calculó la diferencia media correspondiente de cada sistema respecto del control identificado como tal.

El sistema E obtuvo una puntuación media de 1,54 donde le corresponde la categoría próxima a "muy escasa diferencia". Los sistemas DOA y E+DOA presentaron una diferencia global mayor, obtuvieron puntuaciones de 2,8 y 2,48 respectivamente, pertenecientes a una categoría cercana a "escasa/moderada diferencia". A través de un análisis de varianza de dos factores (sujeto y muestras) se evaluó la diferencia significativa entre las muestras (**Tabla 4-32**).

El factor "sujetos" no presentó diferencias significativas ($F_{45,90}$ = 1,45; p = 0,067) indicando que el grupo de consumidores fue coherente en sus evaluaciones; en cambio, el factor tratamientos mostró diferencias significativas entre la muestras ($F_{2,90}$ = 8,9; p < 0,05). Para analizar las diferencias entre el control y las muestras se utilizó el test de Dunnett. Se obtuvo una diferencia crítica de 0,89 indicando que se encontró diferencias significativas entre el control (muestra E) y DOA, y entre el control (muestra E) y E+DOA.

Este análisis puso de manifiesto la importancia de la inclusión de un control camuflado para detectar el efecto placebo, particularmente cuando se trabaja con consumidores (personas no entrenadas) y dada la variabilidad natural que se manifiesta entre las diferentes rodajas de manzana que provienen de un lote de fruta.

Analizando los resultados obtenidos, se concluyó que la deshidratación osmótica con o sin escaldado previo produjo cambios sensoriales significativos en las rodajas de manzana con respecto a las muestras escaldadas. Estos cambios fueron caracterizados por los consumidores como leves.

Tabla 4-32. Valores sensoriales promedio y su correspondiente desviación estándar para el tejido de manzana escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) obtenidos de la prueba diferencia contra control.

Tratamiento	Nº de consumidores	Media
E (Control camuflado)	46	1,54 ± 1,41 [a]
DOA	46	2,8 ± 1,8 [b]
E+DOA	46	2,48 ± 1,53 [b]

Medias con letras distintas indican diferencia significativa p≤0,05

4.3.2.3. Correlación entre las propiedades reológicas y la textura utilizando regresión lineal de cuadrados mínimos parciales

Para correlacionar los atributos texturales con las propiedades reológicas se utilizó el análisis de regresión lineal por cuadrados mínimos parciales.

4.3.2.3.1. Propiedades mecánicas (TPA)

Se utilizaron los atributos texturales dureza (DS), fracturabilidad (FS), cohesividad (CS), jugosidad y crujencia como variables Y o dependientes, y las parámetros mecánicos obtenidos del TPA (dureza, fracturabilidad, dureza 2, área 1, área 2, cohesividad, elasticidad, gomosidad, masticabilidad y modulo de deformabilidad) como variables X o independientes.

El modelo de regresión de PLS con dos factores logró explicar el 73,4 % de la variabilidad de los atributos texturales a través de los parámetros mecánicos. El factor PLS 1 logró explicar el 57,5 % y el factor PLS 2 el 15,9%. Como la inclusión de nuevos factores al modelo no mejoraba la predicción no fueron considerados en el mismo.

El factor PLS 1 explicó el 78,9 % de las variables X y el 57,5 % de las variables Y mientras que el factor PLS 2 explicó el 10,6 % de las variables X y el 15,9 % de las variables Y. Analizando el modelo propuesto por dos factores los atributos jugosidad y crujencia (69,2 y 60,7 % de la varianza explicada respectivamente) fueron los mejores explicados mientras que la dureza, la fracturabilidad y la cohesividad (21,5; 6,1 y 0,8 % de la varianza explicada respectivamente) fueron menos representativos (**Figura 4-34**).

Las correlaciones entre las variables sensoriales e instrumentales se observan en la **Figura 4-35**. Analizando la ubicación de las variables sobre el eje PLS 1 se observa que las parámetros dureza 2 (D_2), fracturabilidad (F), área 1 (A_1), área 2 (A_2), cohesividad, elasticidad y módulo de deformabilidad (E_d) están positivamente relacionados con la crujencia, dureza sensorial (DS) y fracturabilidad sensorial (FS). Sobre el eje PLS 2 se muestra que la jugosidad esta inversamente relacionada con la dureza (D_1). La cohesividad sensorial no se correlacionó con ninguna variable instrumental; esto explicó el bajo porcentaje explicado que se obtuvo para este atributo.

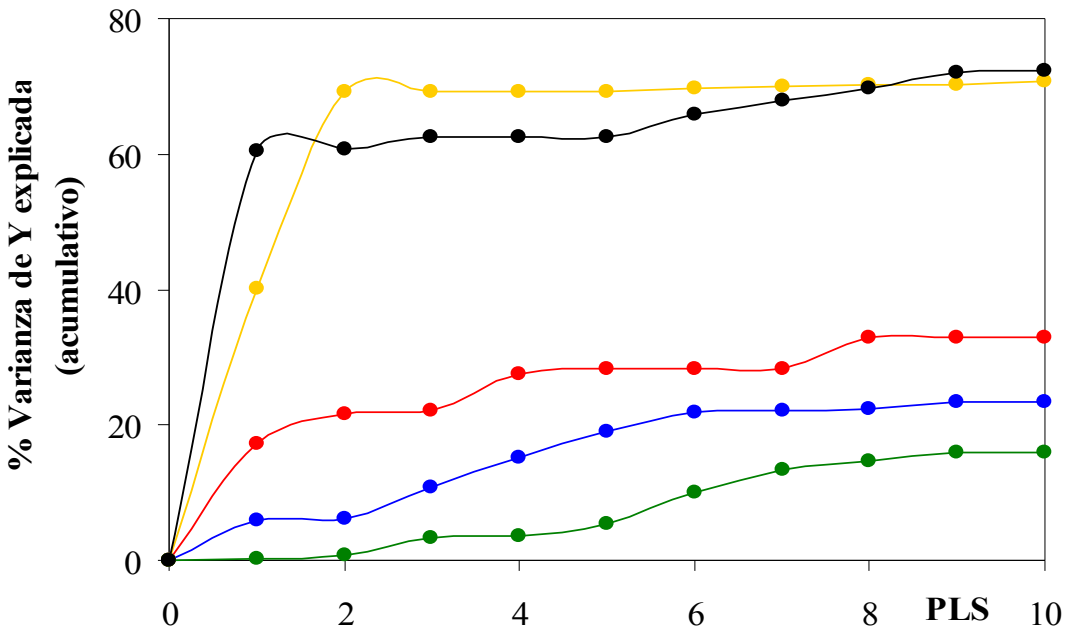


Figura 4-34. Porcentaje de varianza de los atributos sensoriales explicada por los parámetros mecánicos de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo. (—) crujencia, (—) dureza, (—) cohesividad, (—) jugosidad y (—) fracturabilidad.

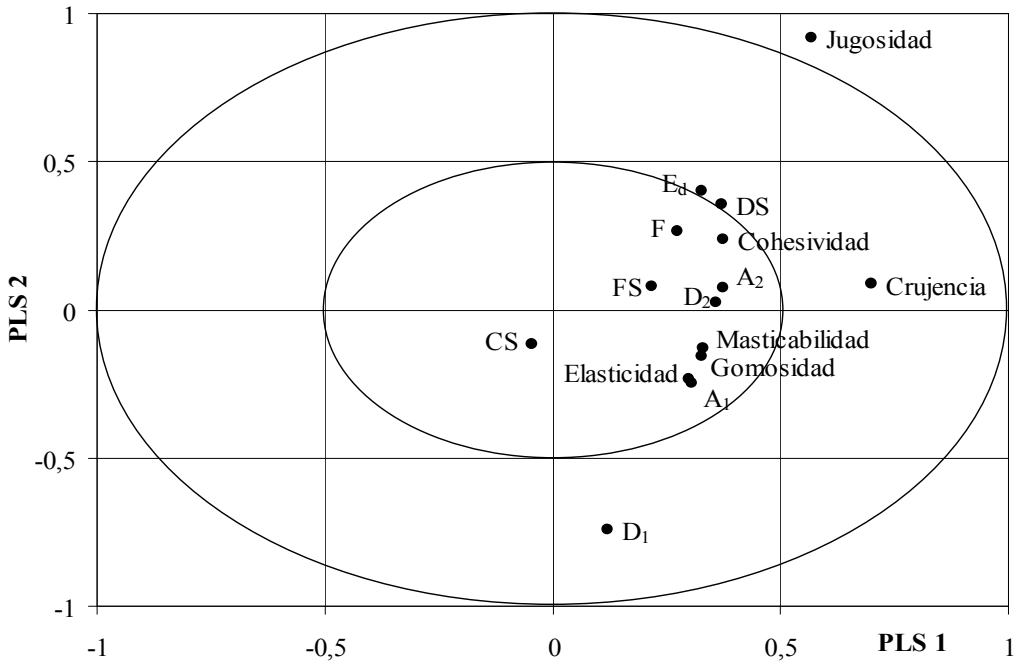


Figura 4-35. Correlación entre los parámetros del TPA y los atributos sensoriales para el tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo.

Las manzanas tratadas térmicamente (E y E+DOA) fueron ubicadas en el cuadrante negativo de la PLS 1, las muestras osmotizadas en la zona central y las manzanas frescas en el cuadrante positivo indicando que en las muestras tratadas disminuyeron las propiedades mecánicas y casi todos los atributos sensoriales (excepto la cohesividad que aumentó). Esta disminución en las propiedades mecánicas y sensoriales fue más relevante en las muestras tratadas con vapor (**Figura 4-36**).

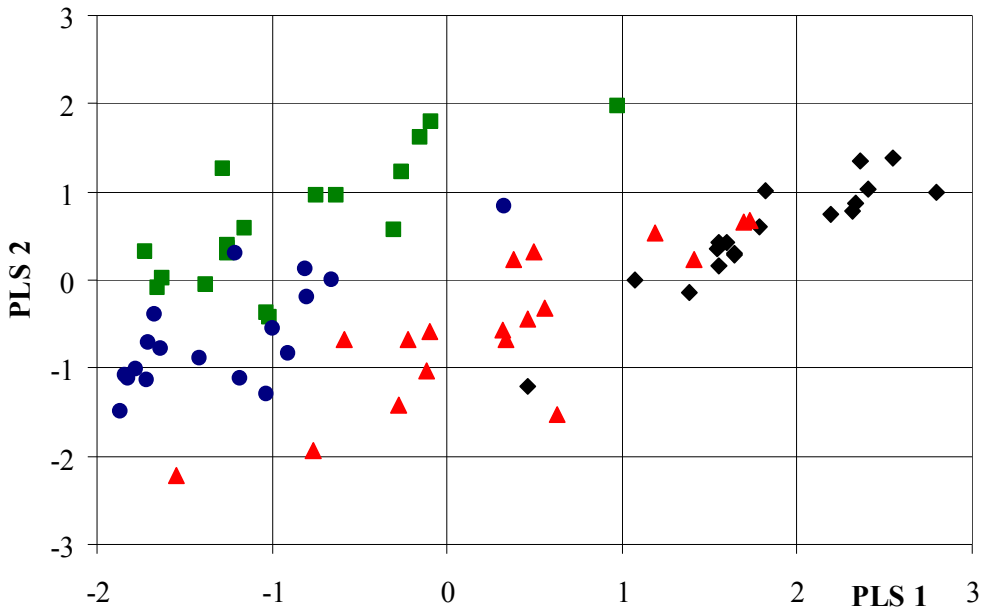


Figura 4-36. Ubicación del tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo en función de la PLS 1 vs PLS 2. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (▲) osmotizado, (●) escaldado + osmotizado.

4.3.2.3.2. Parámetros de fluencia

Se evaluó la correlación entre los parámetros de las curvas de fluencia (variables independientes) y los atributos texturales (variables dependientes). El modelo de regresión lineal de cuadrados mínimos parciales con dos factores logró explicar el 83,6% de la variabilidad de los atributos texturales a través de los parámetros de las curvas de fluencia. El factor PLS 1 explicó el 73 % y el factor PLS 2 el 10,6%. Como la inclusión de nuevos factores al modelo no mejoraba la predicción no fueron considerados en el mismo.

El factor PLS 1 explicó el 57,7 % de las variables X y el 73 % de las variables Y mientras que el factor PLS 2 explicó el 21 % de las variables X y el 10,6 % de las variables Y. Con el modelo propuesto por dos factores los atributos crujencia, jugosidad y dureza

(53,3; 56,2; y 31,2 % de la varianza explicada respectivamente) fueron los mejores explicados mientras que fracturabilidad y cohesividad sensorial fueron poco explicadas (17,9 y 11,7 % de la varianza explicada respectivamente) (**Figura 4-37**).

Las relaciones entre las variables sensoriales e instrumentales se observan en la **Figura 4-38**. Analizando la ubicación de las variables a través del eje PLS 1 se visualiza que los parámetros J_0, J_1 y J_2 están negativamente correlacionados con la crujencia, jugosidad y dureza sensorial. En el eje PLS 2, el tiempo de retardo 2 (λ_2) está positivamente relacionado con la cohesividad sensorial y el parámetro η_N está negativamente correlacionado con la fracturabilidad sensorial.

Las manzanas tratadas térmicamente (E y E+DOA) fueron ubicadas en el cuadrante negativo de la PLS 1, las muestras osmotizadas en la zona central y las manzanas frescas en el cuadrante positivo, indicando que las muestras tratadas mostraron en general un aumento en los parámetros J_0, J_1 y J_2 y en la cohesividad sensorial mientras que el control se caracterizó por tener los valores más altos en dureza, fracturabilidad, crujencia, jugosidad y en el parámetro η_N (**Figura 4-39**).

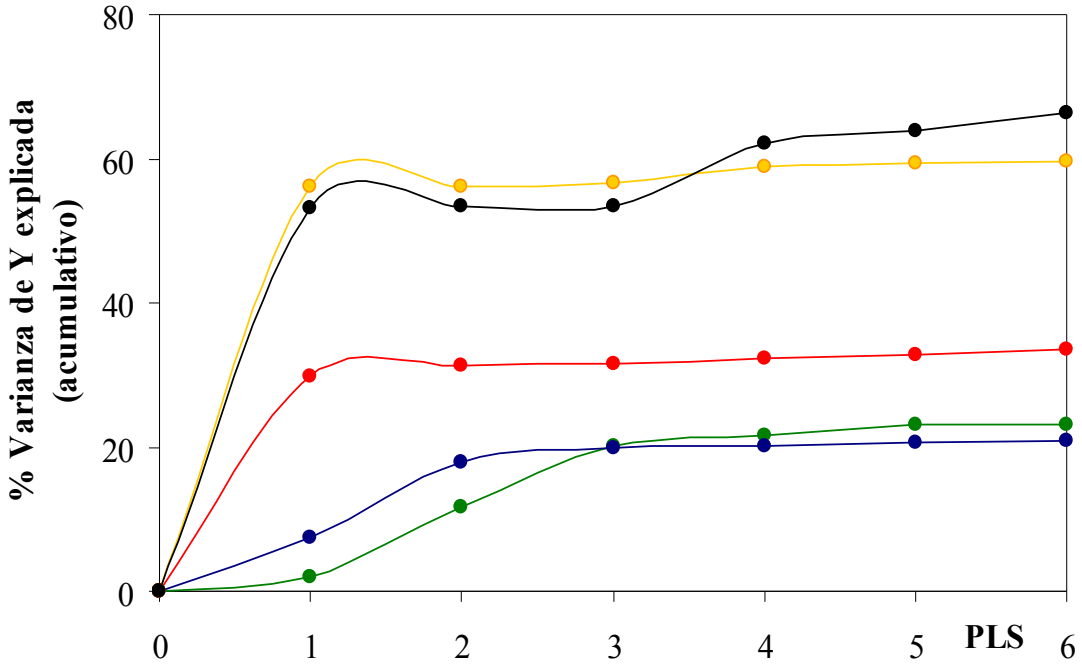


Figura 4-37. Porcentaje de varianza de los atributos sensoriales explicada por los parámetros de fluencia de tejido de manzana fresco, escaldado, y osmotizado con o sin escaldado previo. (—) crujencia, (—) dureza, (—) cohesividad, (—) jugosidad y (—) fracturabilidad.

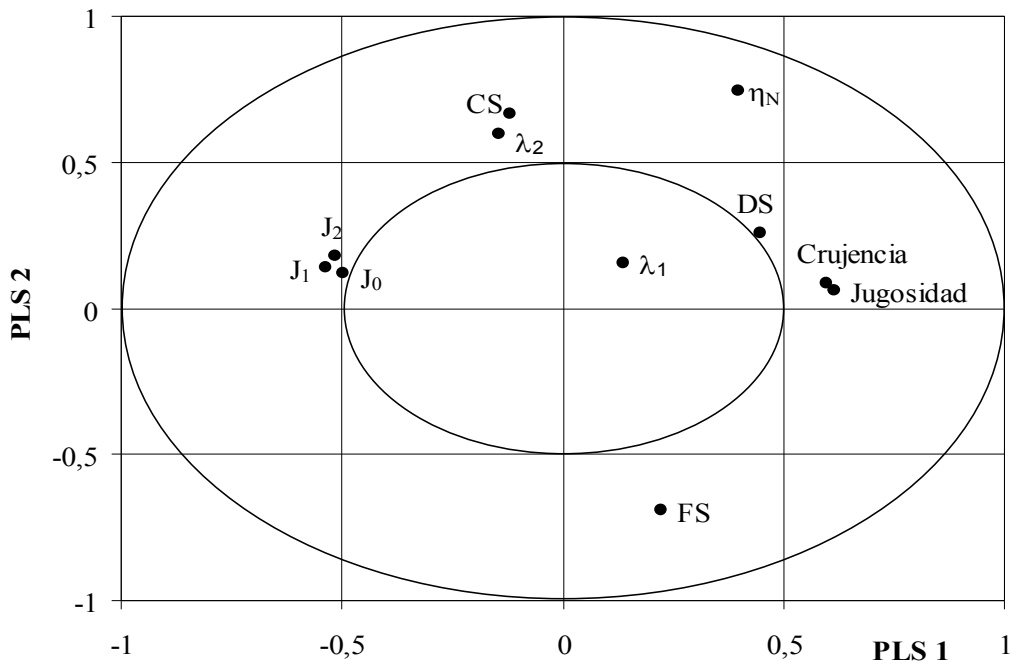


Figura 4-38. Correlación entre las variables de los ensayos de fluencia y los atributos sensoriales para el tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo.

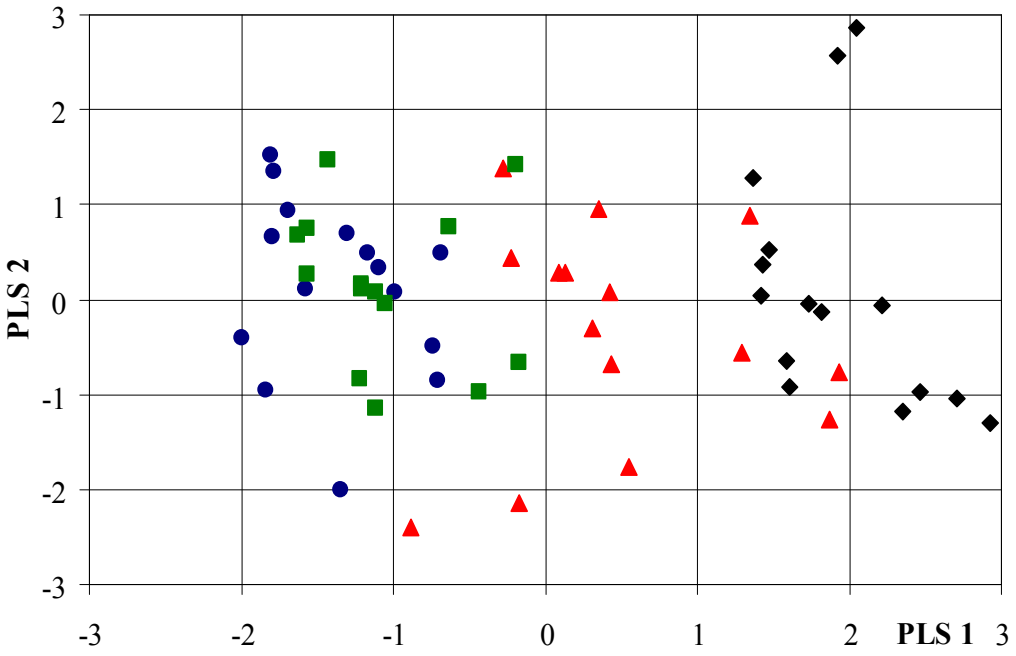


Figura 4-39. Ubicación del tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo en función de la PLS 1 vs PLS 2. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (▲) osmotizado, (●) escaldado + osmotizado.

4.3.2.4. Caracterización microestructural y ultraestructural

Se analizaron los cambios micro y ultraestructurales del tejido parenquimático de manzana fresca, escaldada y deshidratada osmóticamente con o sin escaldado previo mediante microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de transmisión (MET).

Las microfotografías obtenidas con MO del tejido fresco (**Figuras 4-40-A, B**) mostraron células y espacios intercelulares distribuidos en forma heterogénea y anisotrópica. Las células se presentaron en forma irregular y turgente con una estructura celular bien definida. Se observó una gran vacuola central ocupando la mayor parte del volumen total. El citoplasma se mostró pegado firmemente a la pared celular formando una delgada capa de alta densidad óptica. Los espacios intercelulares se presentaron de varias formas y tamaños, siendo irregulares, algunos alargados, equivalentes a tres ó hasta cuatro células. También, se observaron grandes áreas de contacto celular. Las observaciones con MET mostraron paredes celulares con buena densidad electrónica, con el material fibrilar densamente empaquetado, con una laminilla media ocupando una banda central bastante dispersa (**Figura 4-42-A**). En la zona de contacto triangular de tres ó más células se observó a la laminilla media bien definida y con alta densidad (**Figura 4-42-B**). El citoplasma se presentó pegado fuertemente a la pared celular, rodeada por el plasmalema y el tonoplasto, los cuales se observaron íntegros.

Las muestras deshidratadas a presión atmosférica presentaron un arreglo celular similar al control (**Figura 4-40-C**) aunque las paredes celulares se mostraron levemente más onduladas y con reducción de los espacios intercelulares. Se observó en algunas células una leve plasmólisis (micrografías no mostradas). Las paredes celulares aparecieron con buena densidad electrónica, y la estructura de las microfibrillas se advirtió similar al control. Se observó una laminilla media bien definida, el citoplasma más reforzado y unido a la pared con presencia de vesículas (**Figura 4-42-C y D**). El mismo comportamiento fue reportado en la literatura en tejido de melón deshidratado osmóticamente (16 % p/p de glucosa) a presión atmosférica (Martínez y col., 2005) y en manzana deshidratada (22,5% p/p de glucosa) a presión atmosférica (Martínez y col., 2007).

El escaldado provocó ruptura de la membrana celular (disrupción del tonoplasto y plasmalema). Las paredes se observaron menos teñidas y las células más irregulares en forma y tamaño (**Figura 4-41-E y F**). El citoplasma se observó fragmentado (ruptura de membranas) y separado (leve plasmólisis). Las paredes celulares aparecieron con menor

densidad electrónica y leve degradación de la laminilla media (**Figura 4-43-E y F**). Las mismas mostraron en algunas regiones estrías originadas por zonas de alta y baja densidad electrónica.

Las células del tejido deshidratado con escaldado previo presentaron bordes muy plegados y ondulados, con reducción de espacios intercelulares y del número de células por área. Se observaron fragmentos de la membrana celular por ruptura dentro de la célula (**Figura 4-40-G y H**). En TEM (**Figura 4-41-G y H)** las paredes celulares exhibieron buena densidad electrónica, mucho más uniforme que en las solo tratadas térmicamente, y degradación de la laminilla media por efecto del calor. Se observó presencia de vesículas y el citoplasma se observó degradado y separado de la pared celular. El plegamiento de la pared se manifestó con ondulaciones y se observa en la última microfotografía.

En concordancia con la literatura (Alzamora y col., 2008), los tratamientos de deshidratación osmótica a presión atmosférica y/o el tratamiento térmico provocaron pérdida de la turgencia debido principalmente a la plasmólisis del citoplasma y/o disrupción de la membrana celular.

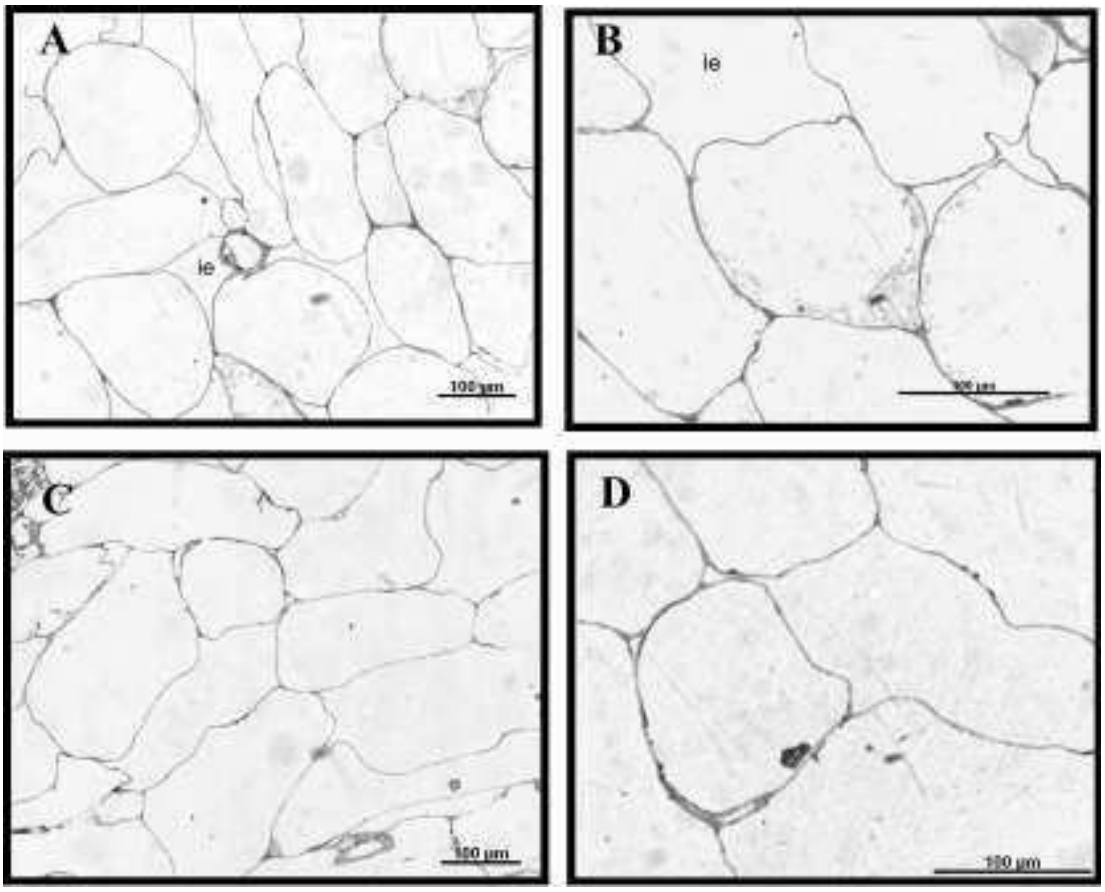


Figura 4-40. Imágenes de microscopia óptica de tejido de manzana fresco y osmotizado. A, B: fresco (control); C, D: osmotizado. ie: espacio intercelular; mc: membrana celular.

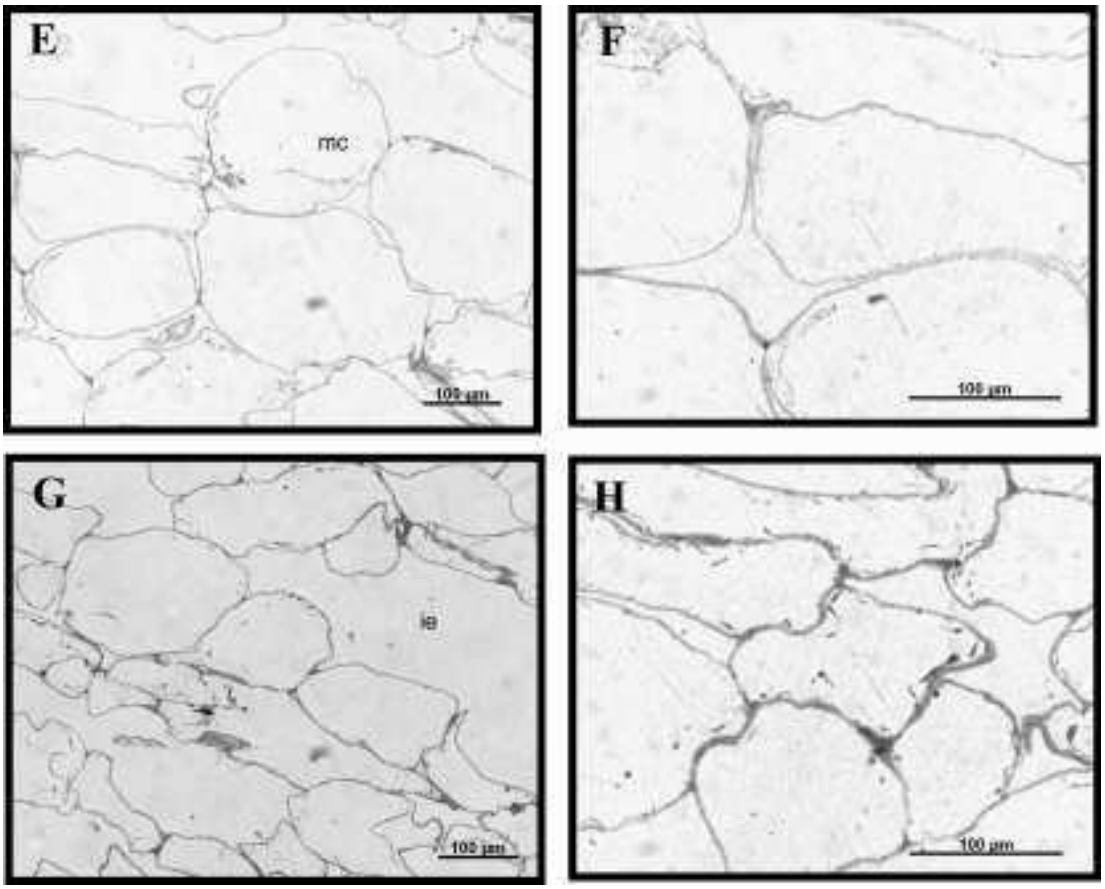


Figura 4-41. Imágenes de microscopia óptica de tejido de manzana escaldado y osmotizado con escaldado previo. E, F: escaldado 90 s; G, H: escaldado + osmotizado. ie: espacio intercelular; mc: membrana celular.

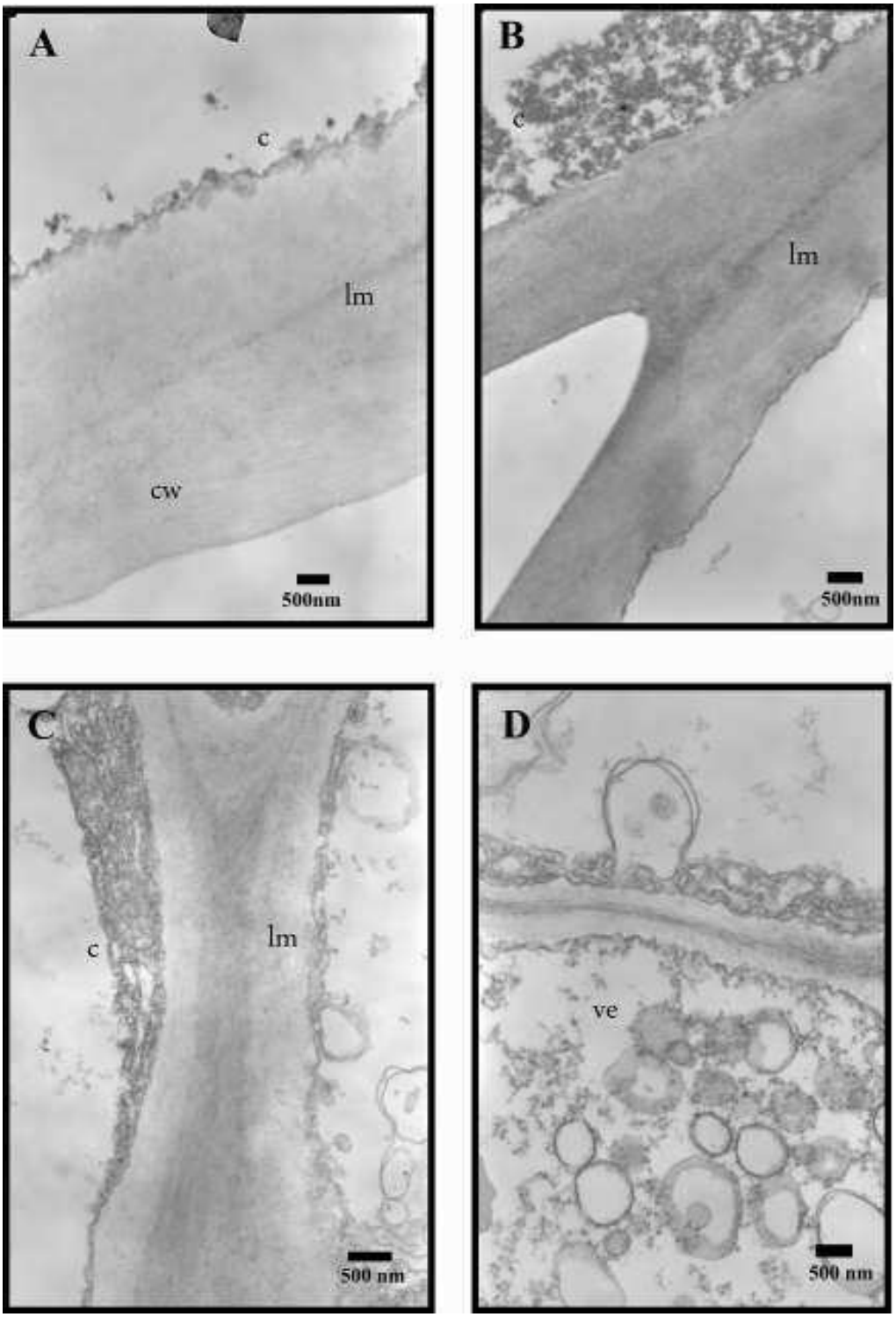


Figura 4-42. Imágenes de microscopia electrónica de transmisión de tejido de manzana fresco y osmotizado. A, B: fresco (control); C, D: osmotizado. cw: pared celular, lm: laminilla media, c: citoplasma, ve: vesícula.

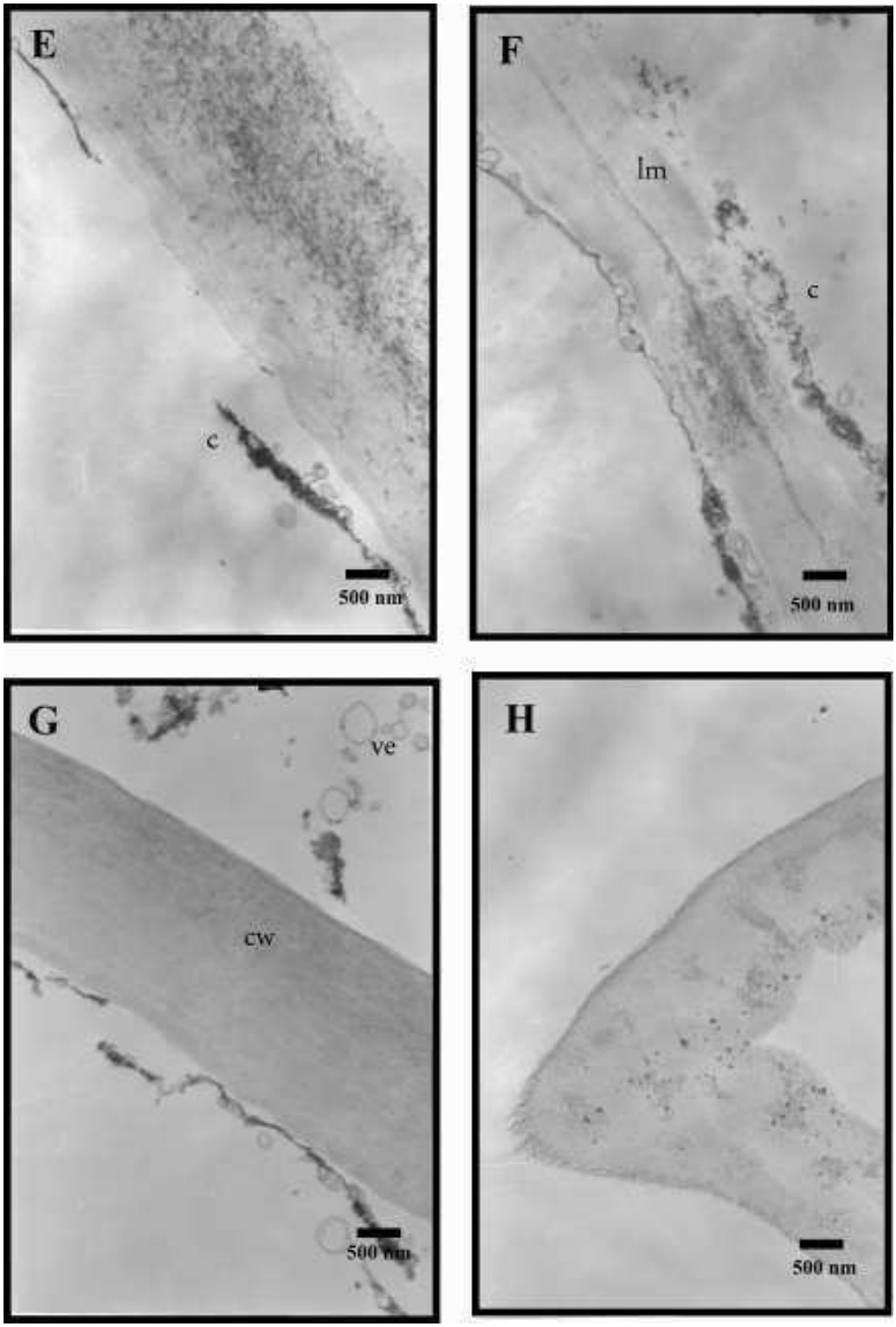


Figura 4-43. Imágenes de microscopia electrónica de transmisión de tejido de manzana escaldado y osmotizado con escaldado previo. E, F: escaldado 90 s; G, H: escaldado + osmotizado. cw: pared celular, lm: laminilla media, c: citoplasma, ve: vesícula.

4.3.3. Deshidratación osmótica en presencia de calcio (con o sin escaldado previo)

La incorporación de calcio se lleva a cabo usualmente con el fin de mantener la integridad estructural de las membranas y las paredes celulares. Esto se logra mediante: la interacción del calcio con los polímeros de la pared celular, principalmente mediante entrecruzamientos con las pectinas de la laminilla media; estabilización de la membrana celular por los iones de calcio; y/o efecto del calcio sobre la presión de turgor (Mignani y col., 1995; Picchioni y col., 1995; Luna-Guzmán y Barrett, 2000).

El lactato de calcio (0,1 % p/p) fue incorporado al tejido de manzana durante la deshidratación osmótica. Se evaluó el efecto de la deshidratación osmótica en presencia de calcio a presión atmosférica (DOA+Ca^{+2}) y combinada con un escaldado previo de 90 segundos (E+DOA+Ca^{+2}) en el tejido de manzana. Se utilizó el mismo lote de manzanas que fue utilizado para los tratamientos de deshidratación osmótica sin presencia de calcio (C, E, DOA, E+DOA). Los valores de las muestras control y escaldada 90 s fueron los mismos para ambos tratamientos, deshidratación osmótica sin y con calcio. Los tratamientos en el tejido de manzana fueron realizados según lo detallado en **Materiales y Métodos sección 3.3.1**.

En la **Tabla 4-33** se detallan los valores de actividad de agua y sólidos solubles obtenidos en las muestras tratadas que fueron utilizadas para la caracterización reológica, textural y estructural de esta sección. Analizando los valores se observa que se alcanzó la actividad de agua requerida.

Tabla 4-33. Valores promedio de a_w y sólidos solubles (ºBrix) y sus correspondientes desvíos estándar de tejido de manzana fresco y osmotizado en presencia de calcio con o sin escaldado previo.

Tratamiento	º Brix	a_w	Temperatura (ºC)
C	11,5 ± 0,7	0,98 ± 0,01	20,0 ± 0,1
DOA+Ca^{+2}	16,5 ± 0,4	0,96 ± 0,01	22,1 ± 0,4
E+DOA+Ca^{+2}	19,4 ± 0,1	0,96 ± 0,01	23,9 ± 0,2

4.3.3.1. Propiedades reológicas

- **Ensayos oscilatorios**

Se determinó el rango viscoelástico lineal (RVL) de las muestras mediante un barrido de amplitud con control de la deformación de cizalla (BA CDC) para deformaciones entre 0,001% y 10% utilizando una frecuencia constante (ω) de 10 s^{-1}. El valor del RVL límite para las muestras fue de 0,007 % para el control, 0,05% para las muestras escaldadas, 0,0013% para las muestras osmotizadas y 0,06% para las muestras osmotizadas con escaldado previo (**Figura 4-44**).

Los ensayos de barrido de frecuencia (BF CDC) se realizaron para valores de frecuencia entre 100 s^{-1} hasta 0,1 s^{-1}, dentro del RVL recomendado por el software del equipo para las muestras frescas (0,005 %). Se utilizó este último para asegurar que todas las muestras evaluadas estuvieran dentro de los límites de linealidad.

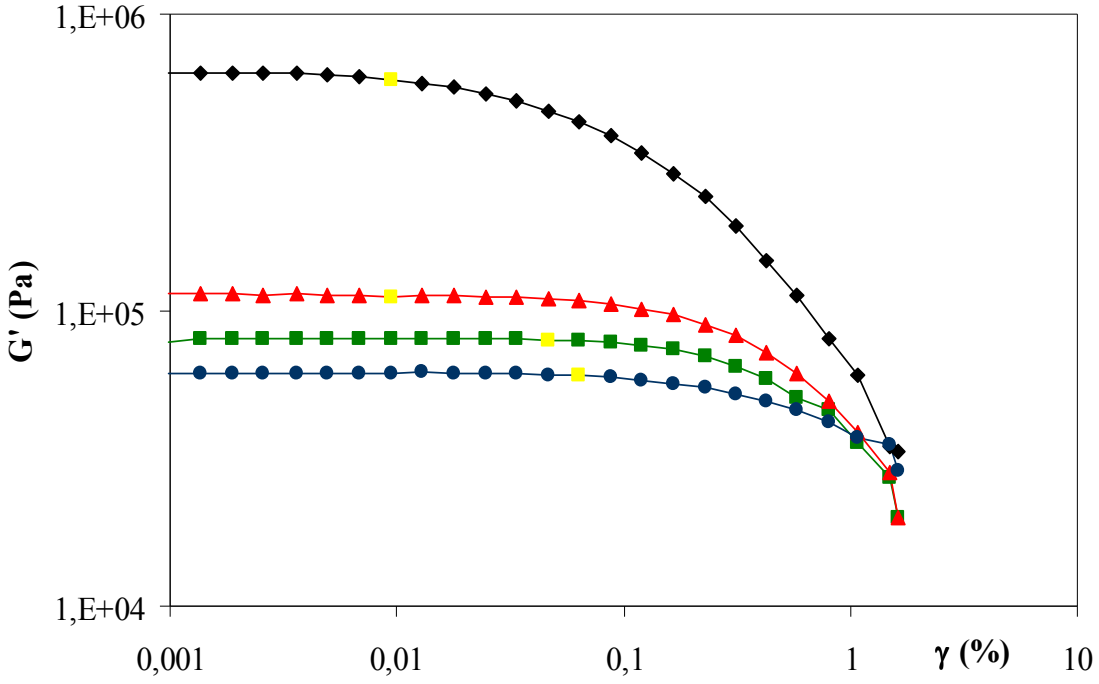


Figura 4-44. Barrido de amplitud con control de la deformación de cizalla de tejido manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio. (—) control, (—) escaldado 90 s, (—) osmotizado con calcio, (—) escaldado + osmotizado con calcio.

El espectro mecánico de los tejidos tratados y fresco se observa en la **Figura 4-45**. Los módulos de almacenamiento (G') en todas las muestras excedieron a los valores de los módulos de pérdida (G'') a lo largo de todo el rango de frecuencia, indicando un predominante comportamiento sólido en el tejido de manzana. La deshidratación osmótica (con o sin escaldado previo) provocó una disminución en los valores del módulo de pérdida y de almacenamiento en todo el rango de frecuencia.

La dependencia de G' y G'' con la frecuencia fue similar a la observada para las muestras deshidratas con o sin tratamiento térmico (sección **Resultados 4.3.2.1**). El análisis estadístico de las curvas del módulo de almacenamiento se realizó según lo detallado en **Materiales y Métodos sección 3.10** (**Tabla 4-34**). Se encontraron diferencias significativas entre las curvas de G' del control y las muestras tratadas (E, DOA+Ca^{+2} y E+DOA+Ca^{+2}) y entre las curvas de DOA+Ca^{+2} y E; y E+DOA+Ca^{+2} y E. No se encontraron diferencias significativas entre DOA+Ca^{+2} y E+DOA+Ca^{+2}.

Como se observó en la sección anterior (**Resultados 4.3.2.1**), el factor de pérdida (tan δ =G"/G') no fue un parámetro adecuado para distinguir diferencias entre los tratamientos (**Figura 4-46**). Las curvas de las muestras tratadas se ubicaron por debajo de la curva correspondiente a la manzana control en todo el rango de frecuencia.

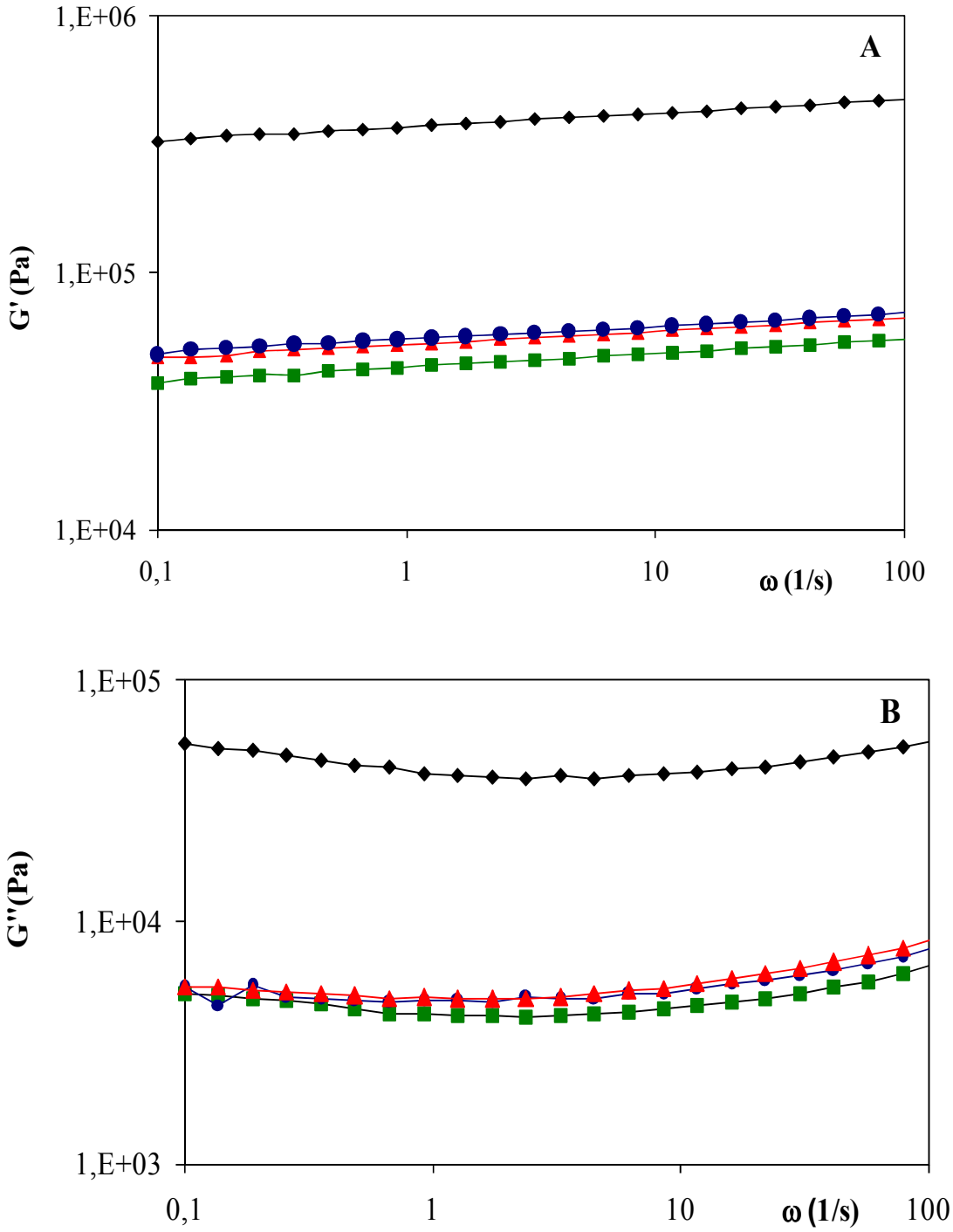


Figura 4-45. Barrido de frecuencia a γ = 0,005% en función de la frecuencia angular (ω = 100 – 0.1 s^{-1}) de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio. A) módulo de almacenamiento (G'), B) módulo de pérdida (G''). (♦) control, (■) escaldado 90 s, (▲) osmotizado en presencia de calcio, (●) escaldado + osmotizado en presencia de calcio.

Tabla 4-34. Resumen del análisis de varianza de los parámetros de regresión de las curvas de G' de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio.

Origen de la varianza	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio del error	Fisher
C	8,02	248	0,032	
E	2,27	248	0,009	
DOA+Ca^{+2}	0,17	248	0,005	
E+DOAE+Ca^{+2}	0,68	248	0,003	
C+E	115,1	498	0,23	
Σ (C+E)	10,3	496	0,02	2526^{***}
Δ [(C+E)- Σ (C+E)]	104,8	2	52,4	
C+DOA+Ca^{+2}	94,1	498	0,19	
Σ (C+DOA+Ca^{+2})	9,2	496	0,02	2291^{***}
Δ [(C+DOA+Ca^{+2})- Σ (C+DOA+Ca^{+2})]	84,9	2	42,45	
C+(E+DOA+Ca^{+2})	88,8	498	0,18	
Σ (C+(E+DOA+Ca^{+2}))	8,7	496	0,017	2283^{***}
Δ [(C+(E+DOA+Ca^{+2}))- Σ (C+(E+DOA+Ca^{+2}))]	80,1	2	40	
E+DOA+Ca^{+2}	4,5	498	0,009	
Σ (C+(E+DOA+Ca^{+2}))	3,45	496	0,007	2283^{***}
Δ [(C+(E+DOA+Ca^{+2}))- Σ (C+(E+DOA+Ca^{+2}))]	1,06	2	0,53	
E+(E+DOA+Ca^{+2})	4,57	498	0,009	
Σ (E+(E+DOA+Ca^{+2}))	2,95	496	0,006	$76,4^{***}$
Δ [(E+(E+DOA+Ca^{+2}))- Σ (E+(E+DOA+Ca^{+2}))]	1,62	2	0,81	
DOA+Ca^{+2}+(E+DOA+Ca^{+2})	1,87	498	0,004	
Σ (DOA+Ca^{+2}+(E+DOA+Ca^{+2}))	1,85	496	0,004	2,68 (NS)
Δ [(DOA+Ca^{+2}+(E+DOA+Ca^{+2}))- Σ (DOA+Ca^{+2}+(E+DOA+Ca^{+2}))]	0,02	2	0,01	

C+E1 = Ajuste de Control +E1; Σ= suma (ajuste C + ajuste E1); Δ = Diferencia (ajuste de C+ E1 – Σ); ***1% nivel de significación; NS: no significativo.

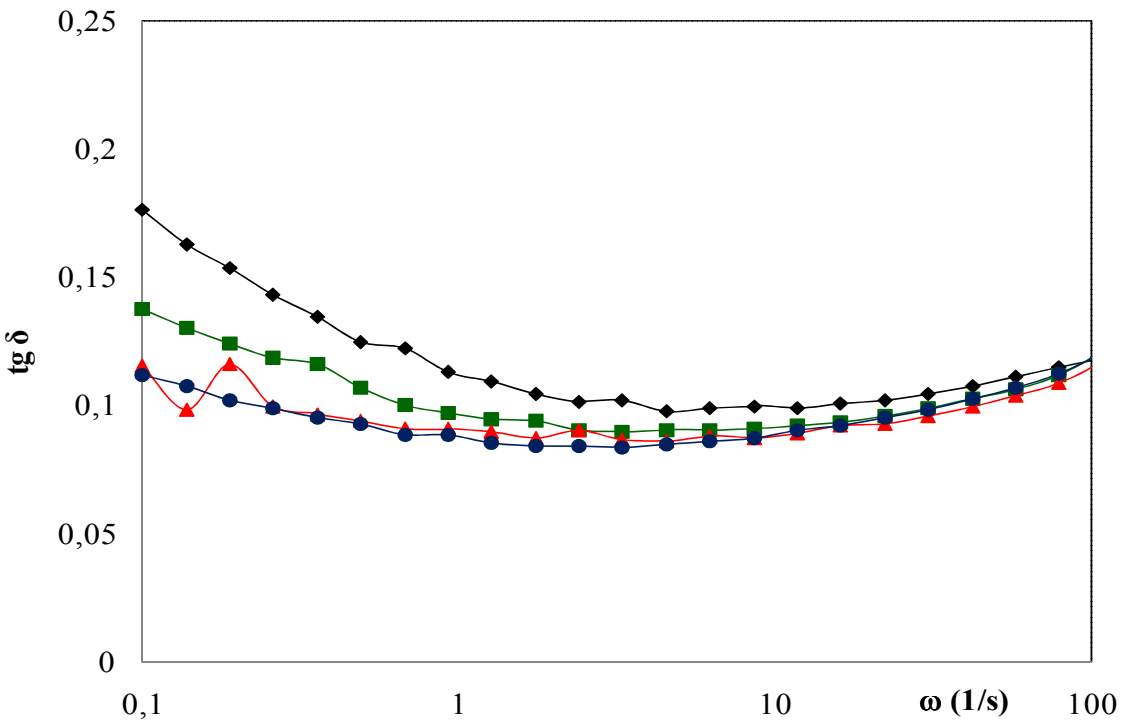


Figura 4-46. Factor de pérdida (tg δ) en función de la frecuencia angular (ω = 100 – 0.1 s^{-1}) de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (▲) osmotizado en presencia de calcio, (●) escaldado + osmotizado en presencia de calcio.

- **Ensayo de fluencia – recuperación**

Se realizó un barrido de amplitud con control del esfuerzo de cizalla (BA CEC). El RVL recomendado por el software del equipo fue de 100 Pa para el tejido fresco y de 50 Pa para el tejido escaldado y osmotizado con escaldado previo (**Figura 4-47**). Por ello, se decidió utilizar un esfuerzo de 35 Pa en los ensayos para asegurarse que en todas las muestras el esfuerzo seleccionado estuviera dentro del rango viscoelástico lineal.

Las curvas experimentales promedio de deformación vs tiempo para las muestras tratadas y control se observan en la **Figura 4-48.** La curva que representa a las muestras deshidratadas en presencia de calcio se ubicó por encima de la de la muestra fresca (control), indicando una mayor deformación ante el mismo esfuerzo aplicado. Las curvas del tejido escaldado y del tejido deshidratado osmóticamente (con escaldado previo), a su vez, se ubicaron por encima de la curva correspondiente al tejido DOA+Ca^{+2}. Por lo tanto, la deshidratación osmótica provocó un ablandamiento de los tejidos provocando una mayor

deformación comparada con el control pero mucho menor que la provocada por el tratamiento térmico.

En general, el efecto de los tratamientos fue coincidente con el observado en la **sección 4.3.2** para las muestras deshidratas sin calcio (C, E, DOA y E+DOA). Comparando las muestras deshidratadas osmóticamente con calcio y sin calcio se observó que las manzanas deshidratadas en presencia de calcio fueron menos deformables, es decir presentaron menor fluencia achicando las diferencias con la curva control.

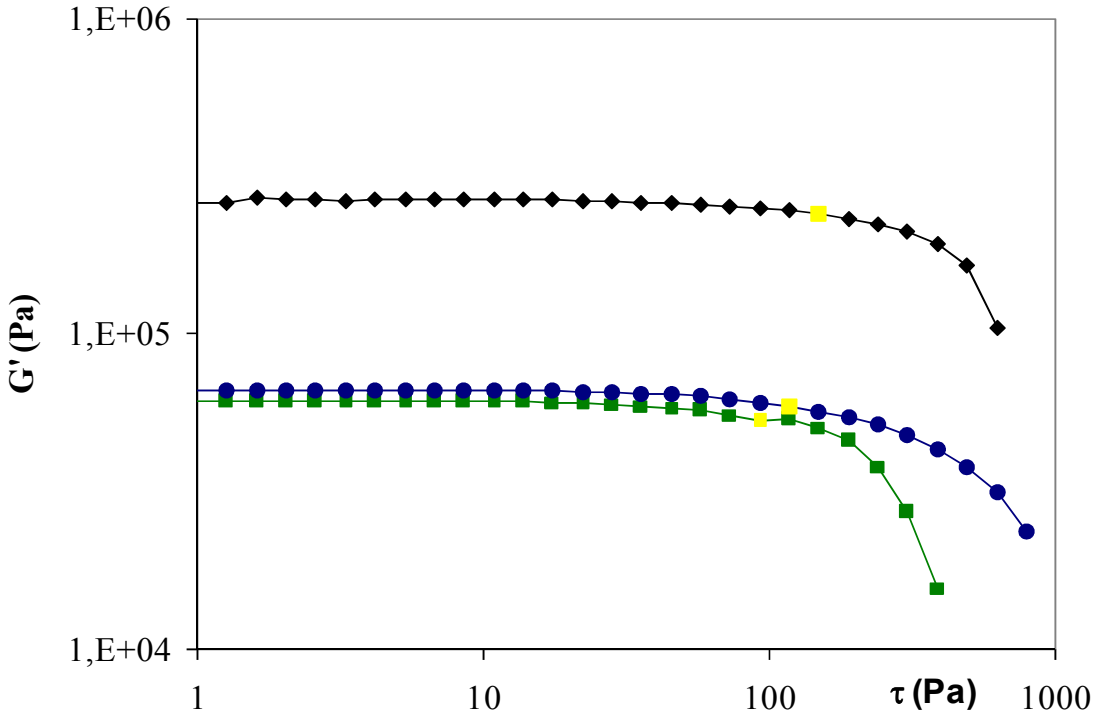


Figura 4-47. Barrido de amplitud con control del esfuerzo de cizalla de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con escaldado previo) en presencia de calcio. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (●) escaldado + osmotizado en presencia de calcio. (■) valor límite recomendado de RVL.

Las curvas de capacitancia experimentales se ajustaron al modelo de Kelvin Voigt generalizado (ecuación 3-5 de la **sección 3.8.1.2 de Materiales y Métodos**) obteniéndose altos coeficientes de correlación (>0,99). En la **Figura 4-49** se observa el comportamiento de las curvas de capacitancia modeladas promedio.

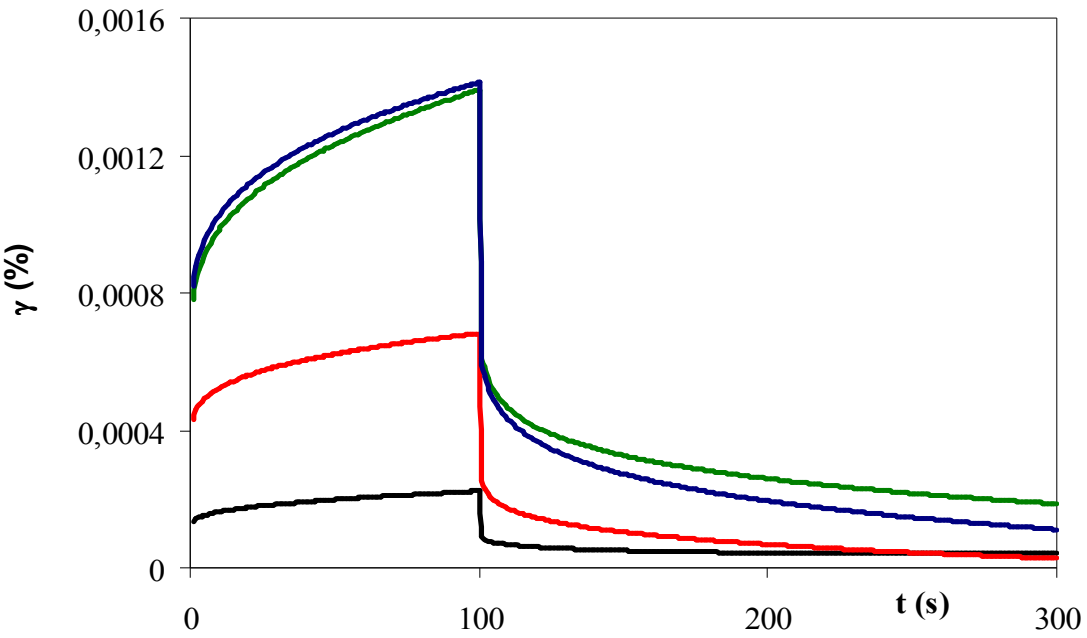


Figura 4-48. Curvas promedio de fluencia – recuperación de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio. (▬) control, (▬) escaldado 90 s, (▬) osmotizado en presencia de calcio, (▬) escaldado + osmotizado en presencia de calcio.

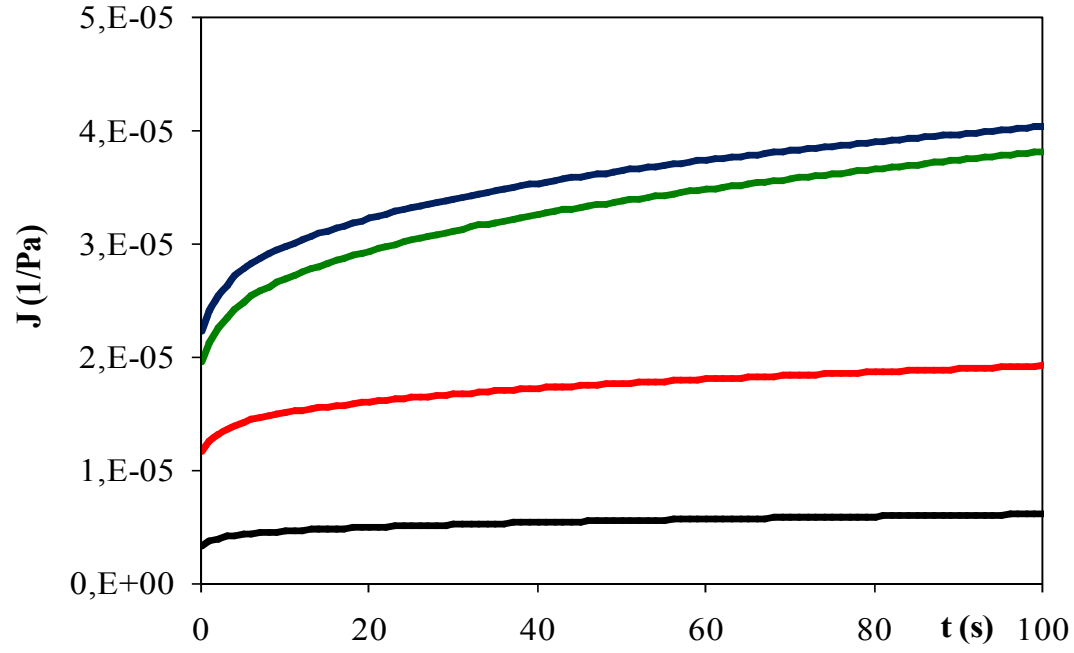


Figura 4-49. Curvas promedio de capacitancia (etapa de fluencia) de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio. (▬) control, (▬) escaldado 90 s, (▬) osmotizado en presencia de calcio, (▬) escaldado+ osmotizado en presencia de calcio.

Los parámetros del modelo utilizado (J_0, J_1, J_2, λ_1, λ_2 y η_N) se muestran en la **Tabla 4-35.** El análisis de varianza multivariado para los parámetros del modelo encontró diferencias significativas ($F_{18,135}$ = 6,5; p<0,0001) entre las muestras tratadas (E, DOA+Ca^{+2} y E+DOA+Ca^{+2}) con respecto al control, y entre las muestras osmotizadas con respecto a las muestras escaldadas y las osmotizadas con escaldado previo. No se encontraron diferencias significativas entre las muestras escaldadas y osmotizadas con escaldado previo.

Tabla 4-35. Parámetros promedio y su correspondiente desviación estándar de las curvas de fluencia* de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio.

Tratamiento	J_0 (1/Pa) ($x10^5$)	J_1(1/Pa) ($x10^5$)	J_2(1/Pa) ($x10^5$)	λ_1(s)	λ_2 (s)	η(Pa.s) ($x10^{-7}$)	
C	0,36 ± 0,14 40,1**	0,11±0,05 20,7**	0,06± 0,03 11,1**	26,8 ± 7,5	2,29 ± 0,76	9,4 ± 3,9 28,1**	a
E	2,1± 0,4 57,1**	0,71± 0,13 17,1**	0,41± 0,06 11,02**	23,7 ± 2,7	2,7 ± 0,3	1,42 ± 0,38 14,8**	b
DOA+Ca^{+2}	1,2 ± 0,3 60,1**	0,29 ± 0,11 14,7**	0,22± 0,06 10,3**	22,6 ± 2,8	2,35 ± 0,27	3,9 ± 1,2 14,9**	c
E+DOA+Ca^{+2}	2,1± 0,4 61,3**	0,7 ± 0,1 15,1**	0,41 ± 0,06 10,5**	23,35 ± 1,61	2,58 ± 0,28	1,7 ± 0,4 12,9**	b

* Parámetros obtenidos a partir de la ecuación 3-5.
** Contribución relativa de cada tipo de capacitancia a la capacitancia total al final de la etapa de fluencia.
Tratamientos con igual letra no presentan diferencias significativas con un 95 % de nivel de confianza. confianza.

En general las capacitancias (instantánea (J_0), de retado (J_1 y J_2) y viscosa ($1/\eta_N$)) de los tejidos tratados aumentaron, provocando una disminución en sus respectivos módulos ($E_i = 1/J_i$). Los aumentos observados en general fueron más marcados en las muestras tratadas térmicamente. Puede concluirse que los tratamientos produjeron una pérdida de elasticidad y rigidez, y un aumento en la fluidez del tejido, especialmente en las muestras escaldadas.

La contribución relativa de cada capacitancia a la capacitancia total, para el tejido de manzana fresca y tratada, se encontró dentro de los siguientes rangos: 61,3 – 40,1 % para J_0; 20,7 – 14,7 % para J_1; 11 – 10,3 % para J_2 y 28,1 – 12,9 % para $1/\eta_N$. La mayor contribución estuvo dada por la capacitancia instantánea (J_0) en todos los casos estudiados.

El aumento de la capacitancia al final de la fase de fluencia de las muestras osmotizadas (con o sin escaldado previo) fue de 630% y 305% respectivamente en comparación con la muestra fresca.

Comparando los parámetros de las curvas de fluencia de las muestras deshidratadas con calcio y sin calcio (analizadas en la sección anterior) se observó que el parámetro viscoso fue más alto en las muestras que presentaron calcio. Para el resto de los parámetros no se observaron cambios relevantes.

El análisis de componentes principales (PCA) indicó que sobre la CP 1 se explica el 88,8% de la variabilidad de los datos, y considerando la CP 2 es posible explicar el 99,9% (**Tabla 4-36**). Las **Tablas 4-37 y 4-38** indican el peso de las variables sobre cada componente**.** La CP 1 explica los cambios producidos en las capacitancias (J_0, J_1, J_2 y $1/\eta_N$), mientras que la CP 2 está asociada al tiempo de retardo λ_1 (**Figura 4-50)**.

Las muestras escaldadas y osmotizadas con escaldado previo fueron colocadas en el cuadrante positivo de la componente principal 1 y el control y las muestras deshidratadas en el cuadrante negativo. Analizando la relación entre las muestras y los parámetros presentes en el cuadrante, la deshidratación osmótica (con o sin escaldado previo) provocó un aumento en las capacitancias (J_0, J_1 y J_2) y una disminución en el coeficiente viscoso (η_N). Este mismo comportamiento se observó para las muestras deshidratas sin calcio evaluadas en la sección anterior.

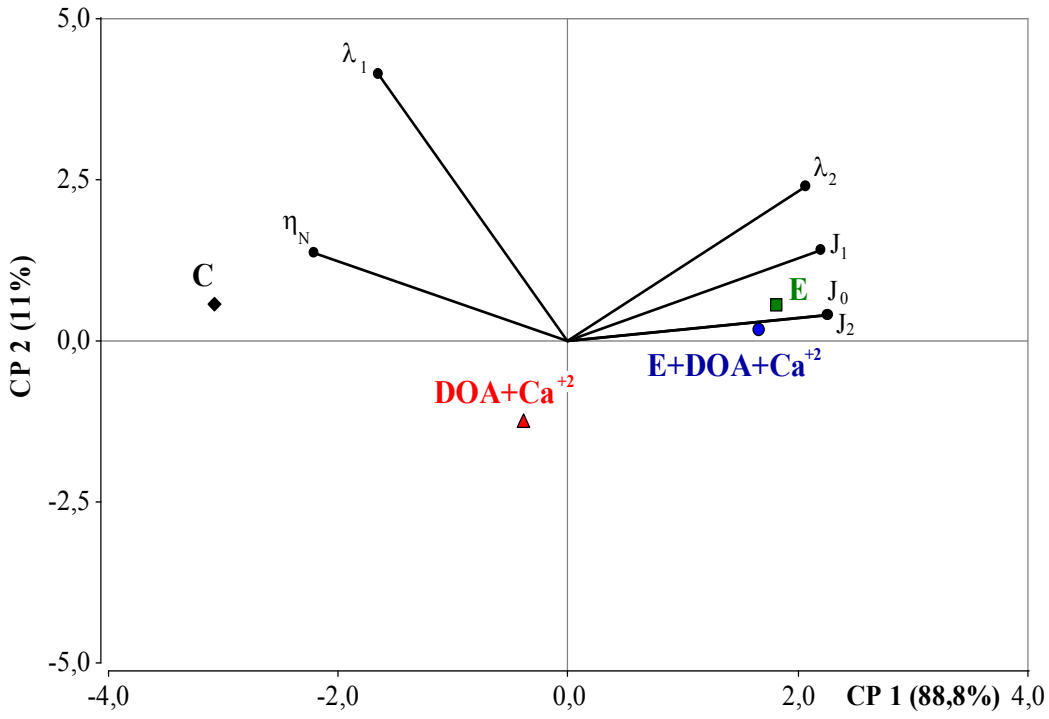


Figura 4-50. Análisis de componentes principales para los parámetros de las curvas de capacitancia de la fase de fluencia de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (▲) osmotizado en presencia de calcio, (●) escaldado + osmotizado en presencia de calcio.

Tabla 4-36, 4-37 y 4-38. Autovalores, autovectores y correlaciones correspondientes al análisis PCA de los parámetros de la curva de capacitancia de la fase de fluencia de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado) en presencia de calcio.

Autovalores			
CP	Valor	Proporción	Prop. Acum.
1	5,33	0,89	0,89
2	0,66	0,11	1

Autovectores		
Variables	CP1	CP2
J_0	0,43	0,07
J_1	0,42	0,27
J_2	0,43	0,09
λ_1	-0,32	0,83
λ_2	0,41	0,42
η_N	-0,43	0,21

Correlaciones con las variables originales		
Variables	CP1	CP2
J_0	1	0,06
J_1	0,97	0,22
J_2	1	0,07
λ_1	-0,74	0,67
λ_2	0,94	0,34
η_N	-0,98	0,17

Valor en rojo representa la variable(s) más relevante(s) de la componente principal.

- **Ensayos de doble compresión**

Las curvas experimentales de los ensayos de doble compresión para las muestras tratadas y control se observan en la **Figura 4-51**. Las curvas para el tejido fresco y escaldado fueron explicadas en la sección anterior (sección **Resultados 4.3.2.1**). El perfil del tejido osmotizado en presencia de calcio presentó un pico máximo durante los primeros segundos de la primera compresión y uno más pequeño al final de la primera compresión; este comportamiento indica que las muestras eran moderadamente duras y fracturables. En las muestras tratadas la pendiente de las curvas de los primeros segundos de la primera compresión fue menor, requiriéndose un menor esfuerzo para obtener la misma deformación. Las muestras tratadas térmicamente y luego deshidratadas presentaron un único pico a los largo de la primera compresión; el tratamiento combinado produjo una pérdida de la fracturabilidad (ausencia del segundo pico).

A partir de las curvas obtenidas se calcularon los parámetros mecánicos para cada muestra (**Tabla 4-39**). Se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos y el control ($F_{30,207}$ = 121; p<0,0001). Todos los tratamientos difirieron significativamente entre si. Para los tejidos deshidratados (DOA+Ca^{+2}) se observó un leve aumento de la dureza y la fracturabilidad con respecto al tejido fresco. Abbott y col. (1989; 2000) demostraron que manzanas infiltradas con soluciones de cloruro de calcio utilizando vacio presentaron valores más altos en la firmeza con respecto al tejido fresco. Sams y col. (1993) reportaron que la incorporación de calcio en el tejido de manzana redujo la velocidad de ablandamiento de tejido y las reacciones de senescencia durante el almacenamiento.

En las muestras escaldadas y en las deshidratadas con escaldado previo se encontraron importantes disminuciones en todos los parámetros mecánicos incluyendo la dureza y una pérdida total de fracturabilidad en E+DOA+Ca^{+2}.

El módulo de deformabilidad disminuyó considerablemente para los tejidos tratados indicando una pérdida de la rigidez. Anino y col. (2006) también reportaron una disminución abrupta en el módulo de deformabilidad para manzanas inmersas 2h en una solución de glucosa con o sin calcio, si bien las concentraciones de calcio utilizadas por estos autores fueron mayores. Este comportamiento es fácil de visualizar en la **Figura 4-51** donde se observa una disminución en la pendiente durante los primeros tres segundos en la primera compresión.

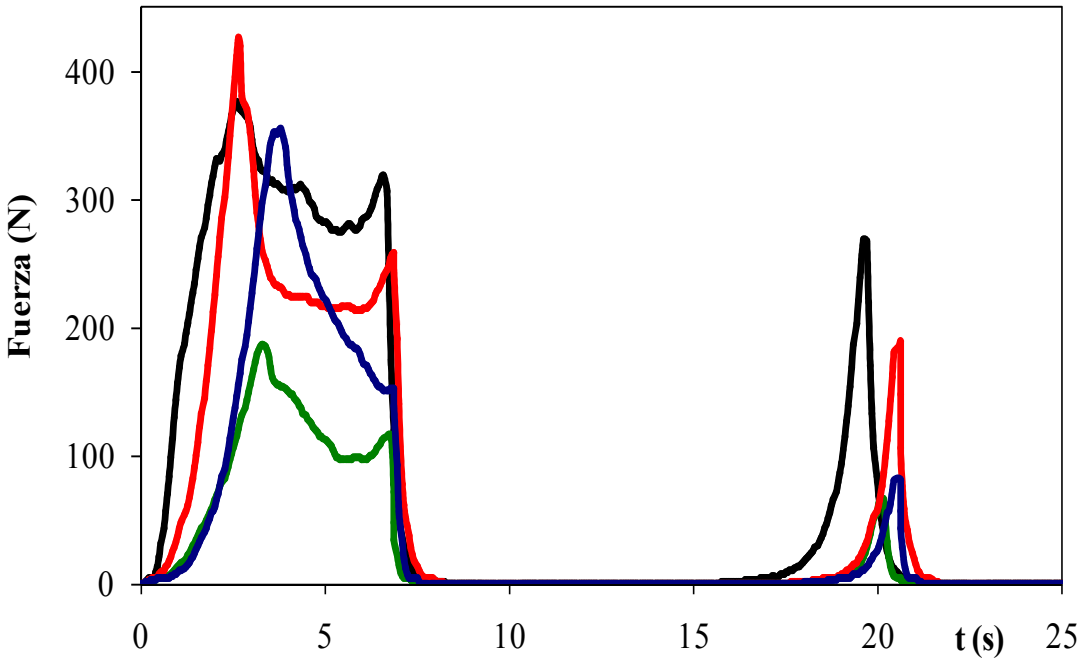


Figura 4-51. Curvas típicas de doble compresión de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio. (—) control, (—) escaldado 90 s, (—) osmotizado en presencia de calcio, (—) escaldado + osmotizado en presencia de calcio.

El análisis de componentes principales para los parámetros mecánicos con las muestras (**Figura 4-52**) explicó el 94 % de la variabilidad de los datos considerando las dos primeras componentes principales (**Tabla 4-40**). La CP 1 fue explicada por las diferencias encontradas en la dureza en la segunda compresión, el área bajo la curva en la primera compresión, el área bajo la curva en la segunda compresión, la cohesividad, la elasticidad, la gomosidad y la masticabilidad. El 11% faltante fue explicado por la CP 2 a través de los cambios en la dureza en la primera compresión, la fracturabilidad y el módulo de deformabilidad (**Tabla 4-41 y 4-42)**. Analizando la ubicación de las muestras en el gráfico, las muestras con tratamiento más severos (E y E+DOA+Ca^{+2}) fueron ubicadas en el cuadrante negativo de la CP 1 indicando la disminución de sus características texturales. En cambio, la muestra osmotizada (DOA) se encontró en el cuadrante positivo de la CP 1 muy cercana a la muestra control indicando que sus parámetros (menos la dureza que aumentó) sufrieron una leve disminución debido al tratamiento.

Tabla 4-39. Parámetros promedio y su correspondiente desviación estándar de las curvas de doble compresión de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio.

Tratamiento	Fracturabilidad (N)	Dureza (N)	Dureza 2 (N)	Área 1 (J)	Área 2 (J)	Elasticidad (-)	Cohesividad (-)	Gomosidad (N)	Masticabilidad (N)	E_d (N/mm^2)	
C	287,9 ± 31,1	293,2 ± 30,3	225 ± 20	1,39 ± 0,13	0,11 ± 0,01	0,55 ± 0,06	0,081 ± 0,01	23,9 ± 3,3	13,2 ± 2,9	1,92 ± 0,53	a
E	196,2 ± 24,5	196,2 ± 24,5	80.4 ± 9.3	0,7 ± 0,1	0,03 ± 0,01	0,33 ± 0,03	0,04 ± 0,01	8 ± 1	2,7 ± 0,5	0,11 ± 0,02	b
DOA+Ca^{+2}	315,8 ± 41	315,8 ± 41	164 ± 24	1,16 ± 0,14	0,08 ± 0,01	0,51 ± 0,05	0,07 ± 0,01	20,8 ± 2,7	11 ± 2	0,16 ± 0,02	c
E+DOA+Ca^{+2}	No detectado	281,2 ± 34,6	83,8 ± 8,2	0,87 ± 0,1	0,04 ± 0,01	0,33 ± 0,03	0,04 ± 0,01	8 ± 1	2,7 ± 0,5	0,10 ± 0,02	d

Tratamientos con igual letra no presentan diferencias significativas con un 95 % de nivel de confianza.

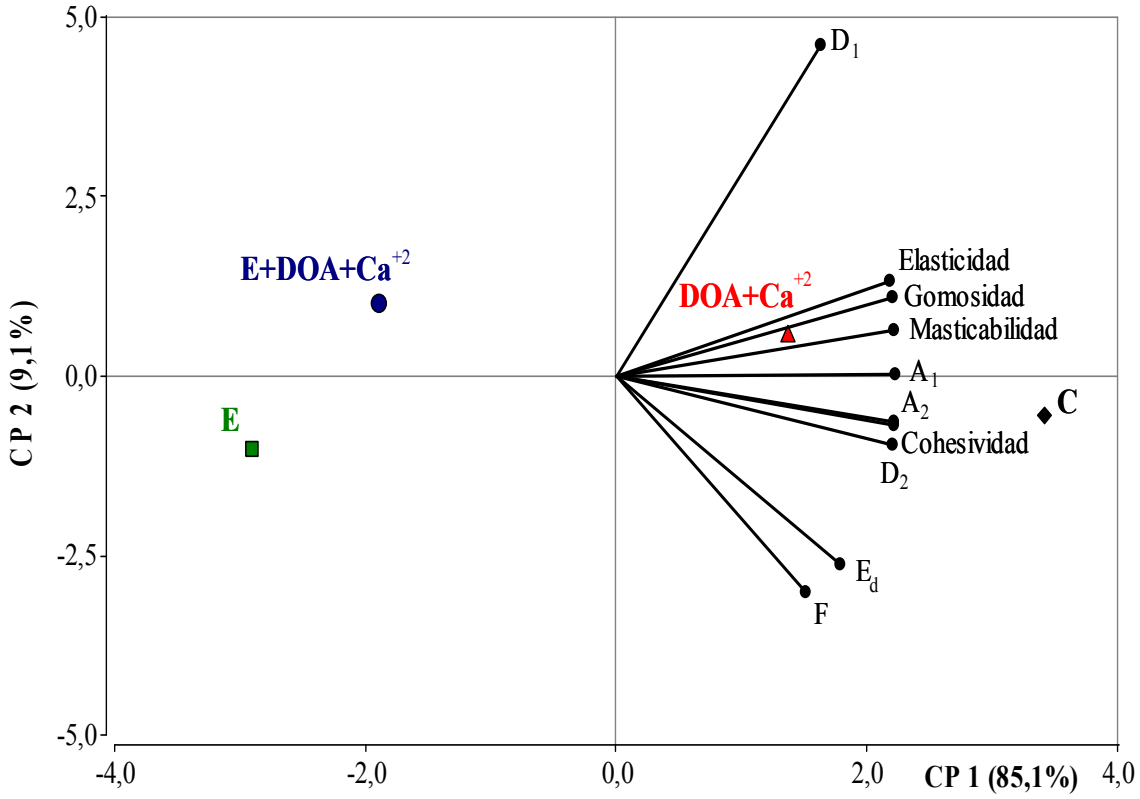


Figura 4-52. Análisis de componentes principales para los parámetros de las curvas de doble compresión de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (▲) osmotizado en presencia de calcio, (●) escaldado + osmotizado en presencia de calcio.

Tabla 4-40, 4-41 y 4-42. Autovalores, autovectores y correlaciones correspondientes al PCA de los parámetros mecánicos de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio.

Autovalores			
CP	Valor	Proporción	Prop. Acum.
1	8,51	0,85	0,85
2	0,91	0,09	0,94

Autovectores		
Variables	CP 1	CP 2
Fracturabilidad (F)	0,23	-0,46
Dureza (D_1)	0,25	0,71
Dureza 2 (D_2)	0,34	-0,15
Area 1 (A_1)	0,34	4,1E-03
Area (A_2)	0,34	-0,1
Elasticidad	0,34	0,2
Cohesividad	0,34	-0,1
Gomosidad	0,34	0,17
E_d	0,27	-0,4
Masticabilidad	0,34	0,1

Correlaciones con las variables originales		
Variables	CP 1	CP 2
Fracturabilidad (F)	0,68	-0,44
Dureza (D_1)	0,73	0,68
Dureza 2 (D_2)	0,99	-0,14
Area 1 (A_1)	1	3,9E-03
Area (A_2)	0,99	-0,1
Elasticidad	0,98	0,19
Cohesividad	0,99	-0,1
Gomosidad	0,99	0,16
E_d	0,8	-0,38
Masticabilidad	0,99	0,09

Valor en rojo representa la variable(s) más relevante(s) de la componente principal.

4.3.3.2. Análisis sensorial

4.3.3.2.1. Análisis del perfil de textura

La textura oral de las muestras osmotizadas (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio fue evaluada a través de los parámetros dureza, fracturabilidad, cohesividad, adhesividad al paladar, crujencia y jugosidad por el panel altamente entrenado. La adhesividad al paladar se descartó, ya que los evaluadores no percibieron dicha propiedad en el tejido de manzana. En la **Tabla 4-43** se detallan los resultados obtenidos en las evaluaciones sensoriales.

El tratamiento térmico solo o combinado con la deshidratación osmótica en el tejido de manzana provocó una disminución significativa en la dureza sensorial. Los juicios emitidos por el panel fueron consistentes y homogéneos ($F_{5,15}$ = 1,43; p = 0,25). Se encontraron diferencias significativas ($F_{3,15}$=4,09; p = 0,01) entre el control y las muestras tratadas térmicamente (E y E+DOA Ca^{+2}). No se encontraron diferencias significativas entre el control y la muestra osmotizada (DOA+Ca^{+2}). Abbott y col. (2000) reportaron que el tejido de manzana infiltrado con calcio fue evaluado por los panelistas como más duro y crujiente con respecto al tejido fresco (control).

Tabla 4-43. Parámetros texturales promedio y su correspondiente desviación estándar obtenidos del análisis sensorial de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio.

Tratamiento	Dureza	Fracturabilidad	Cohesividad	Crujencia	Jugosidad
C	7,24±1,27[a]	6,4±2,9[a]	3,5±1,7[a]	7,68±0,41[a]	5,98±0,24[a]
E	6,3±0,5[b]	5,41±1,72[b]	3,27±1,02[a]	4,74±0,49[b]	5,16±0,39[b]
DOA+Ca^{+2}	7,2±0,5[ab]	6,61±1,75[a]	2,9±0,8[a]	6,1±0,6[c]	5,33±0,39[b]
E+DOA+Ca^{+2}	6,86±0,83[b]	5,6±1,5[b]	3,05±0,62[a]	4,89±0,28[b]	5,04±0,43[b]

Medias de una misma columna con igual letra no presentan diferencias significativas con un 95 % de nivel de confianza.

La fracturabilidad sensorial presentó el mismo comportamiento que la dureza sensorial, es decir, un disminución significativa ($F_{3,24}$ = 9,85; p<0,0001) en las muestras tratadas térmicamente con respecto al control fue percibida por los panelistas. No se encontraron diferencias entre las muestras tratadas térmicamente. Se observó una gran dificultad entre los panelistas para evaluar dicho parámetro en este tipo de muestras; por ende los juicios emitidos no fueron homogéneos ($F_{8,24}$ = 39,8; p<0,0001) pero todos los evaluadores percibieron a las muestras tratadas como menos fracturables.

La cohesividad sensorial no presentó diferencias significativas ($F_{3,15}$ = 1,4; p = 0,26) entre el tejido fresco y los tratados. No se encontraron diferencias significativa entre las evaluaciones de los panelistas ($F_{5,15}$=2,11; p=0,09). Estos resultados no se correlacionaron con la cohesividad instrumental de las muestras.

La crujencia del tejido escaldado y osmotizado con o sin escaldado previo en presencia de calcio disminuyó significativamente ($F_{3,15}$ = 127,8; p<0,0001) con respecto al control. Diferencias significativas fueron encontradas entre las muestras osmotizadas con escaldado previo y sin escaldado previo (DOA+Ca^{+2} y E+DOA+Ca^{+2}). No se encontraron diferencias entre el tejido escaldado y osmotizado con escaldado previo. El panel fue consistente y homogéneo en sus evaluaciones ($F_{5,15}$ = 2,31; p = 0,07).

La deshidratación osmótica y el escaldado provocaron cambios significativos en la jugosidad del tejido de manzana. Los tejidos tratados se percibieron como menos jugosos con respecto al control ($F_{3,24}$ = 26,4; p<0,0001). No se encontraron diferencias significativas entre los tejidos tratados (E, DOA+Ca^{+2} y E+DOA+Ca^{+2}). El factor

evaluadores del análisis de varianza no presentó diferencias significativas ($F_{8,24} = 1,73$; $p = 0,12$).

En la **Figura 4-53** se observa el Perfil de Textura sensorial obtenido para la muestras control, escaldada y osmotizadas (con y sin escaldado) en presencia de calcio. El tratamiento térmico en el tejido de manzana (E y E+DOA) provocó una disminución relevante en la crujencia y un ablandamiento en los tejidos reflejado en una disminución en la dureza. En general, los tratamientos evaluados provocaron una disminución en la jugosidad y fracturabilidad, siendo la misma más marcada en las muestras tratadas térmicamente.

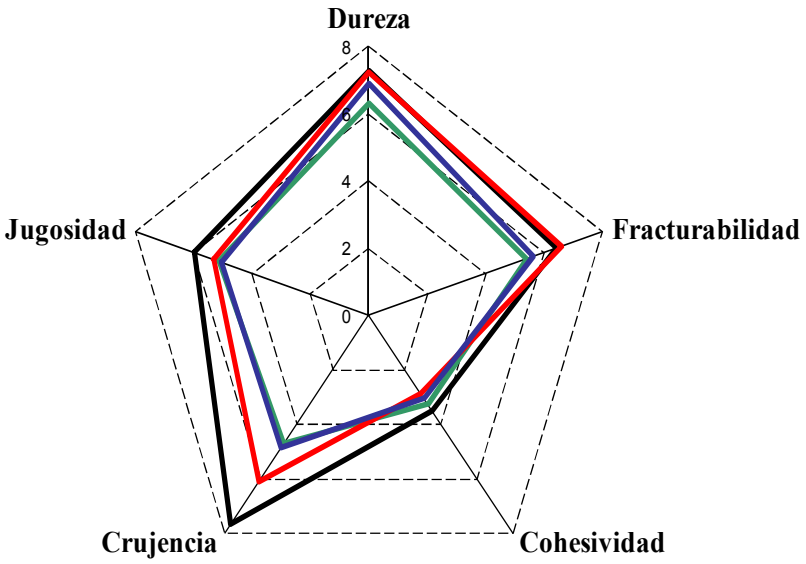


Figura 4-53. Perfil de Textura para el tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio. (—) control, (—) escaldado 90 s, (—) osmotizado, (—) escaldado + osmotizado.

4.3.3.2.2. Prueba de diferencia contra control

Los consumidores evaluaron la magnitud de la diferencia global entre las distintas muestras de manzana según se detalla en **Materiales y Métodos sección 3.7.2.**

Como control se utilizó la muestra escaldada durante 90 s (C) y los sistemas comparados con el control fueron:

- Control camuflado (E)
- Manzana osmotizada a presión atmosférica en presencia de calcio (DOA+Ca^{+2})

- Manzana escaldada y luego osmotizada a presión atmosférica en presencia de calcio (E+DOA+Ca^{+2})

Con los resultados obtenidos a partir de la escala numérica y verbal de categorías (desde 1: sin diferencia y 7: extremada diferencia), se calculó la diferencia media correspondiente de cada sistema respecto del control identificado como tal.

El sistema E obtuvo una puntuación media de 1,24 donde le corresponde la categoría próxima a "muy escasa diferencia". Los sistemas DOA+Ca^{+2} y E+DOA+Ca^{-2} presentaron una diferencia global mayor, obtuvieron puntuaciones de 2,26 y 1,9 respectivamente, pertenecientes a una categoría cercana a "escasa/moderada diferencia". A través de un análisis de varianza de dos factores (sujeto y muestras) se evaluó la diferencia significativa entre las muestras (**Tabla 4-44**).

El factor "sujeto" no presentó diferencias significativas ($F_{45,90}$ = 1,42; p = 0,08) indicando que el grupo de consumidores fue coherente en sus evaluaciones; en cambio, el factor tratamientos fue significativo ($F_{2,90}$ = 6,6; p < 0,05). Para analizar las diferencias entre el control y las muestras se utilizó el test de Dunnett. Se obtuvo una diferencia crítica de 0,76 indicando que se encontró diferencias significativas entre el control (muestra E) y DOA+Ca^{2}. No se encontraron diferencias significativas entre el control (muestra E) y E+DOA+Ca^{2}.

Analizando los resultados obtenidos, se concluyó que la deshidratación osmótica produce cambios sensoriales significativos en las rodajas de manzana con respecto a las muestras escaldadas. Estos cambios fueron caracterizados por los consumidores como leves.

Tabla 4-44. Valores sensoriales promedio y su correspondiente desviación estándar de tejido de manzana escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio obtenidas de la prueba diferencia contra control.

Tratamiento	Nº de consumidores	Media
E (control camuflado)	46	1,24 ± 1,18 [a]
DOA+Ca^{+2}	46	2,26 ± 1,54 [b]
DOAE + Ca^{+2}	46	1,91 ± 1,7 [a]

Medias con letras distintas indican diferencia significativa p≤0,05.

4.3.3.3. Correlación entre las propiedades reológicas y la textura utilizando regresión lineal de cuadrados mínimos parciales

Para correlacionar los atributos texturales con las propiedades reológicas se utilizó el análisis de regresión lineal por cuadrados mínimos parciales.

4.3.3.3.1. Propiedades mecánicas (TPA)

Se utilizaron los atributos texturales dureza, fracturabilidad, cohesividad, jugosidad y crujencia como variables Y o dependientes, y las parámetros obtenidos del TPA (dureza, fracturabilidad, dureza 2, área 1, área 2, cohesividad, elasticidad, gomosidad, masticabilidad y modulo de deformabilidad) como variables X o independientes.

El modelo de regresión de cuadrados mínimos parciales con dos factores logró explicar el 77,2 % de la variabilidad de los atributos texturales a través de los parámetros instrumentales. El factor PLS 1 logró explicar el 69,9 % y el factor PLS 2 el 7,3 %. Como la inclusión de nuevos factores al modelo no mejoraba la predicción no fueron considerados en el mismo.

El factor PLS 1 explicó el 77,9 % de las variables X y el 69,9 % de las variables Y mientras que el factor PLS 2 explicó el 9,5 % de las variables X y el 7,3 % de las variables Y. Analizando el modelo propuesto, los atributos mejores explicados considerando los dos factores fueron jugosidad y crujencia (47,8 y 74,4 % de la varianza explicada respectivamente) mientras que la dureza, fracturabilidad y cohesividad (16,8; 4,7 y 1,3 % de la varianza explicada respectivamente) fueron menos explicados (**Figura 4-54**).

Las correlaciones entre las variables sensoriales e instrumentales se observan en la **Figura 4-55**. Analizando la ubicación de las variables sobre el eje PLS 1 puede notarse que los parámetros dureza 2 (D_2), fracturabilidad (F), área 1 (A_1), área 2 (A_2) y cohesividad están positivamente relacionadas con la fracturabilidad sensorial (FS); la gomosidad, elasticidad, dureza (D_1) y masticabilidad están positivamente relacionados con la dureza sensorial (DS). A lo largo del eje PLS 2, la jugosidad y la crujencia esta positivamente relacionados con el módulo de deformabilidad (E_d). La cohesividad sensorial no se correlacionó con ninguna variable instrumental, justificando el bajo porcentaje explicado que se obtuvo para este atributo.

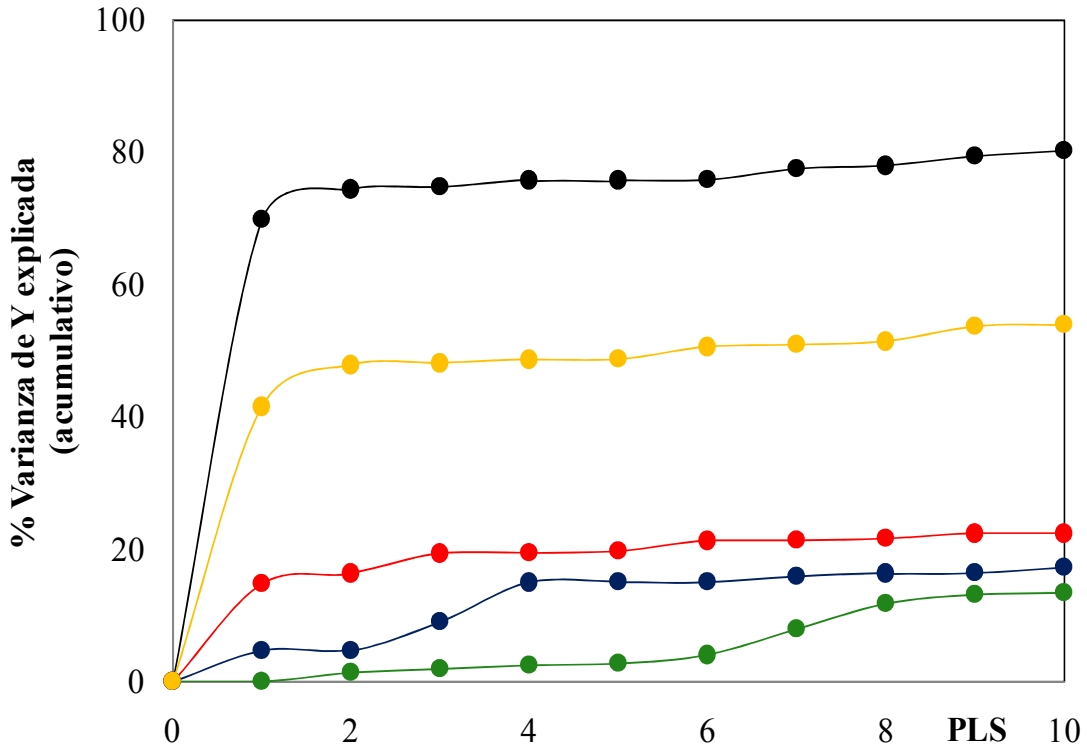


Figura 4-54. Porcentaje de varianza de los atributos sensoriales explicada por los parámetros mecánicos de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio. (—) crujencia, (—) dureza, (—) cohesividad, (—) jugosidad, (—) fracturabilidad.

En general las manzanas tratadas térmicamente (E y E+DOA+Ca^{+2}) fueron ubicadas en el cuadrante negativo de la PLS 1, las muestras osmotizadas en la zona central y las manzanas frescas en el cuadrante positivo indicando que en las muestras tratadas disminuyeron las propiedades mecánicas y casi todos los atributos sensoriales (excepto la cohesividad que aumentó). Esta disminución en las propiedades instrumentales y sensoriales fue más relevante en las muestras tratadas con vapor (**Figura 4-56**).

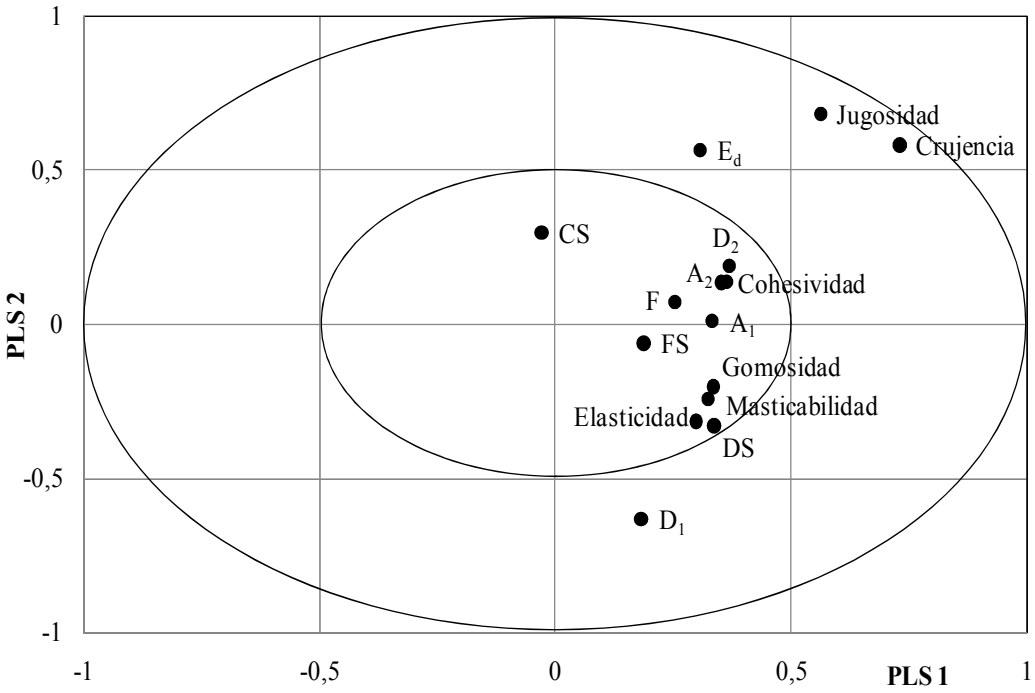


Figura 4-55. Correlación entre las variables del TPA y los atributos sensoriales para el tejido de manzana fresco, escaldado 90 s, osmotizado con o sin escaldado previo en presencia de calcio.

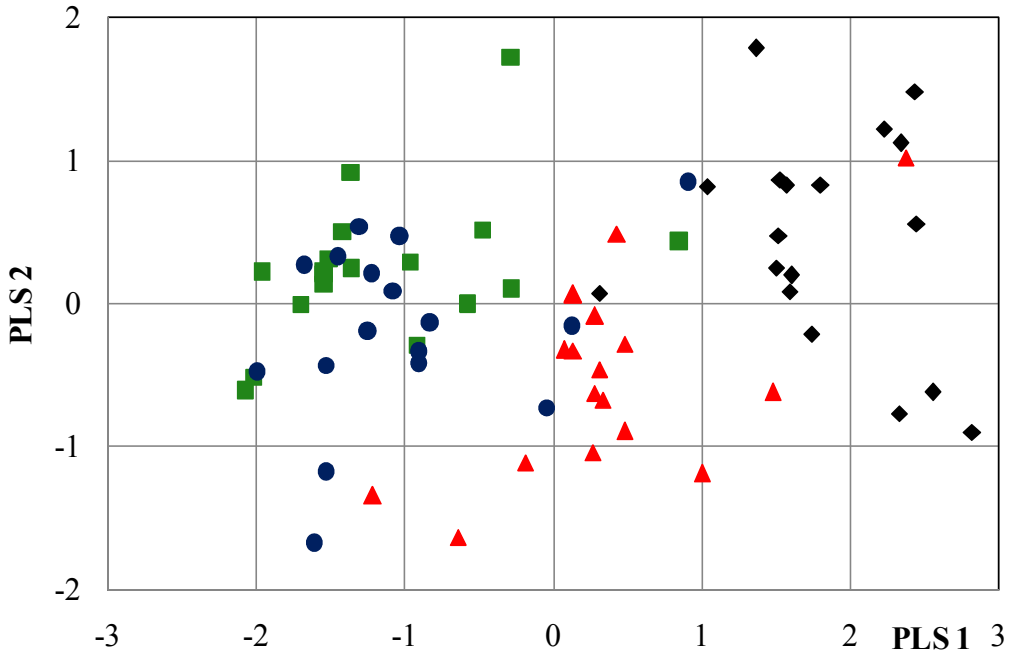


Figura 4-56. Ubicación del tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio en función de la PLS 1 vs PLS 2. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (▲) osmotizado, (●) escaldado + osmotizado.

4.3.3.3.2. Parámetros de fluencia

Se estudió la correlación entre los parámetros de las curvas de fluencia (variables independientes) y los atributos texturales (variables dependientes). El modelo de regresión lineal de cuadrados mínimos parciales con dos factores logró explicar el 83,8 % de la variabilidad de los atributos texturales a través de los parámetros de las curvas de fluencia. El factor PLS 1 explicó el 70,1 % y el factor PLS 2 el 13,7 %. Como la inclusión de nuevos factores al modelo no mejoraba la predicción no fueron considerados en el mismo.

El factor PLS 1 explicó el 57,4 % de las variables X y el 70,1 % de las variables Y mientras que el factor PLS 2 explicó el 27,5 % de las variables X y el 13,7 % de las variables Y. Con el modelo propuesto por dos factores los atributos crujencia, jugosidad y fracturabilidad (68,7; 42,7; y 29,8 % de la varianza explicada respectivamente) fueron los mejores explicados mientras que dureza y cohesividad sensorial fueron poco explicadas (12,6; y 12,1 % de la varianza explicada respectivamente) (**Figura 4-57**).

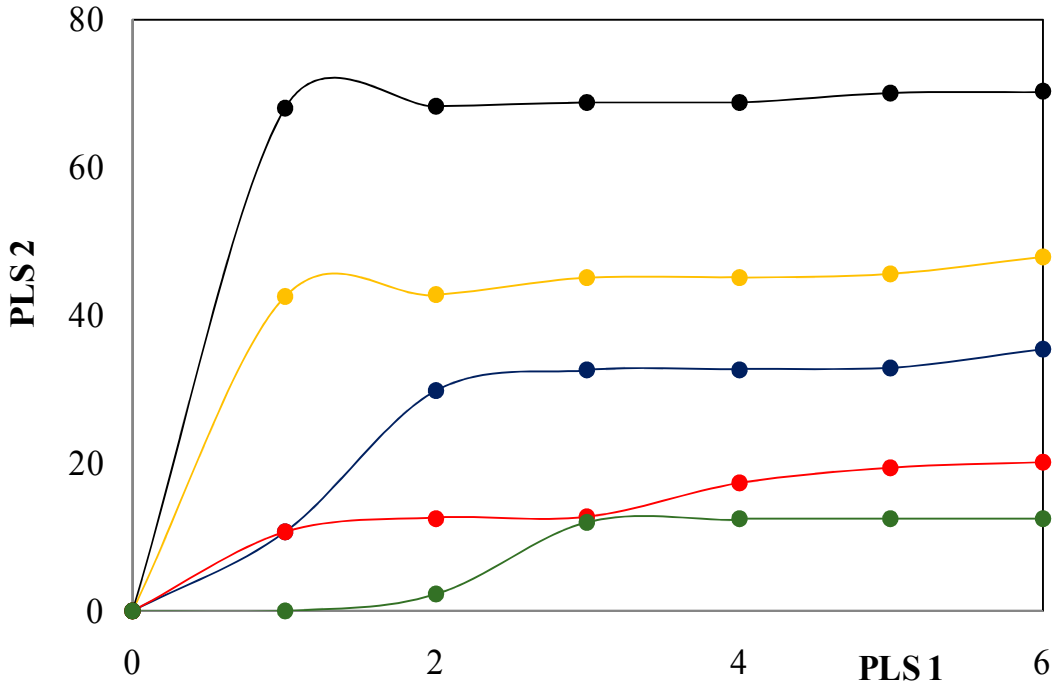


Figura 4-57. Porcentaje de varianza de los atributos sensoriales explicada por los parámetros de fluencia de tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio. (—) crujencia, (—) dureza, (—) cohesividad, (—) jugosidad, (—) fracturabilidad.

Las correlaciones entre las variables sensoriales e instrumentales se observan en la **Figura 4-58**. Si se analiza la ubicación de las variables a través del eje PLS 1, la crujencia y la jugosidad están negativamente correlacionados con los parámetros J_0, J_1 y J_2 y positivamente correlacionado con el parámetro η_N. En el eje PLS 2, el tiempo de retardo 1 (λ_1) está negativamente relacionado con la fracturabilidad sensorial.

En general las manzanas tratadas térmicamente (E y E+DOA+Ca^{+2}) fueron ubicadas en el cuadrante positivo de la PLS 1, las muestras osmotizadas en la zona central y las manzanas frescas en el cuadrante negativo indicando que las muestras tratadas mostraron un aumento en los parámetros J_0, J_1 y J_2 y una disminución en la crujencia y jugosidad (**Figura 4-59**).

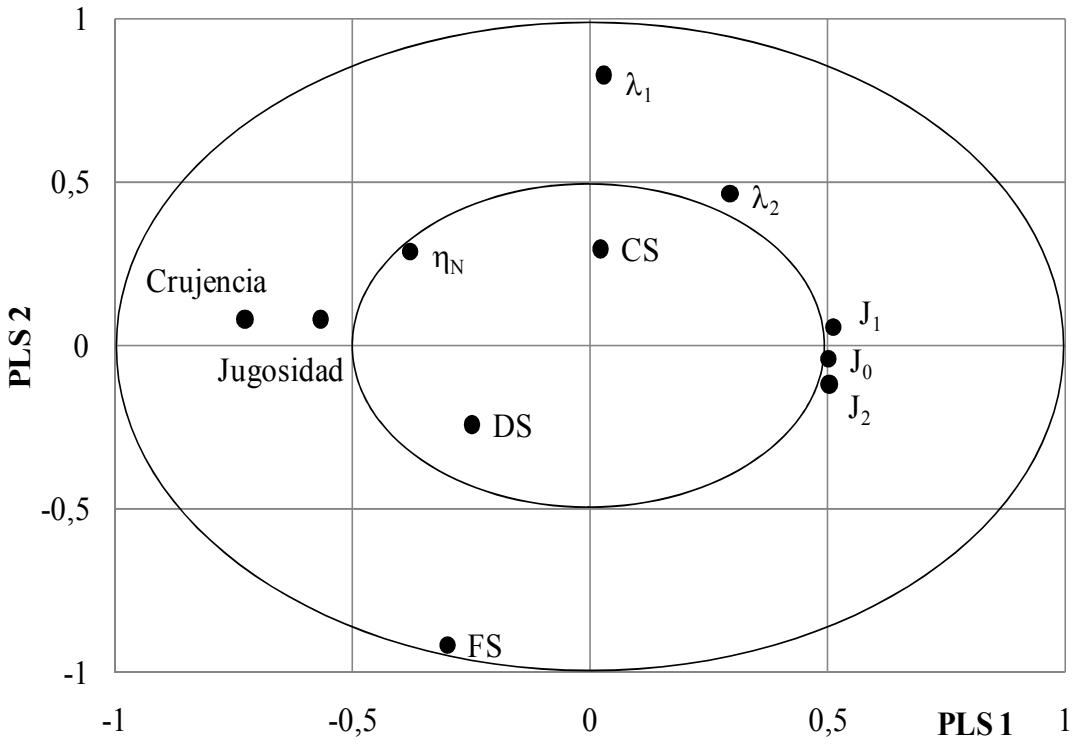


Figura 4-58. Correlación entre las variables de los ensayos de fluencia y los atributos sensoriales para el tejido de manzana fresco, escaldado 90 s, osmotizado en presencia de calcio, escaldado y osmotizado en presencia de calcio.

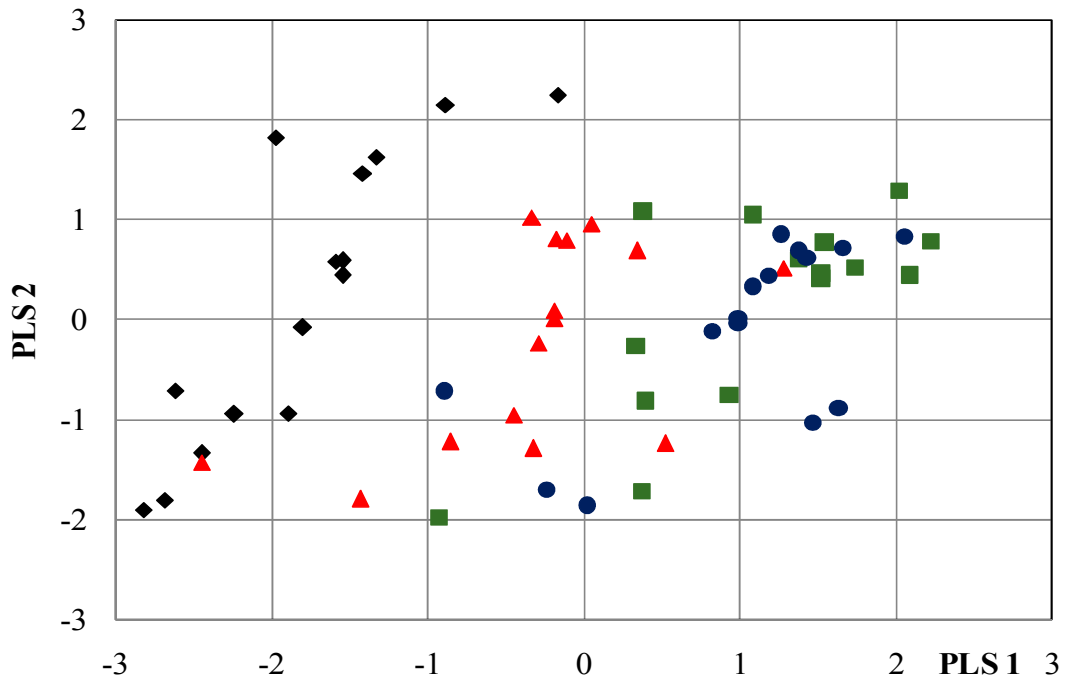


Figura 4-59. Ubicación del tejido de manzana fresco, escaldado y osmotizado (con o sin escaldado previo) en presencia de calcio en función de la PLS 1 vs PLS 2. (♦) control, (■) escaldado 90 s, (▲) osmotizado en presencia de calcio, (●) escaldado + osmotizado en presencia de calcio.

4.3.3.4. Caracterización microestructural y ultraestructural

Se analizaron los cambios micro y ultraestructurales del tejido parenquimático de manzana fresco, escaldado y deshidratado osmóticamente en presencia de calcio con o sin escaldado previo mediante microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de transmisión (MET).

Las nuevas microfotografías obtenidas con MO y TEM para el tejido fresco se observan en las **Figuras 4-60-A, B y 4-62-A, B**. El tejido presentó arreglo no homogéneo y anisotrópico, importantes espacios intercelulares, citoplasma parietal, y plasmalema, tonoplasto y otras membranas íntegras. Las paredes mostraron buena densidad electrónica con la laminilla media bien definida.

Las muestras deshidratadas a presión atmosférica en presencia de calcio se mostraron similar al control (**Figura 4-60-C**). Se observó leve plasmólisis y reducción de espacios intercelulares (**Figura 4-60-D**), buena densidad electrónica, laminilla media bien definida y el citoplasma muy teñido (**Figura 4-62-C y D**). Estos resultados se

corresponden con los reportados por Alzamora y col. (2008) para tejido de manzana fortificado con calcio.

El tejido escaldado presentó ruptura de la membrana celular (disrupción del tonoplasto y plasmalema). Las células se observaron más irregulares en forma y tamaño y presentaron menor contacto entre ellas (**Figura 4-61-E y F**). Las paredes celulares aparecieron con menor densidad electrónica, leve degradación de laminilla media en algunas zonas y con el citoplasma fragmentado y separado de la pared por la ruptura de membranas (**Figura 4-63-E y F**). La pared aparecía muy densa en la zona de los plasmodesmos (**Figura 4-63-F**).

El tejido deshidratado en presencia de calcio con escaldado previo presentó la membrana celular fragmentada y algunas células totalmente plasmolizadas (**Figura 4-61-G y H**). Se observó plegamiento importante de paredes y reducción de espacios intercelulares y del número de células por área. Las paredes celulares aparecieron más reforzadas con buena densidad electrónica y con degradación parcial de la estructura y de la laminilla media por efecto del calor. Las paredes plegadas se manifiestaron con ondulaciones, tal como se observa en la última microfotografía (**Figura 4-63-G y H).**

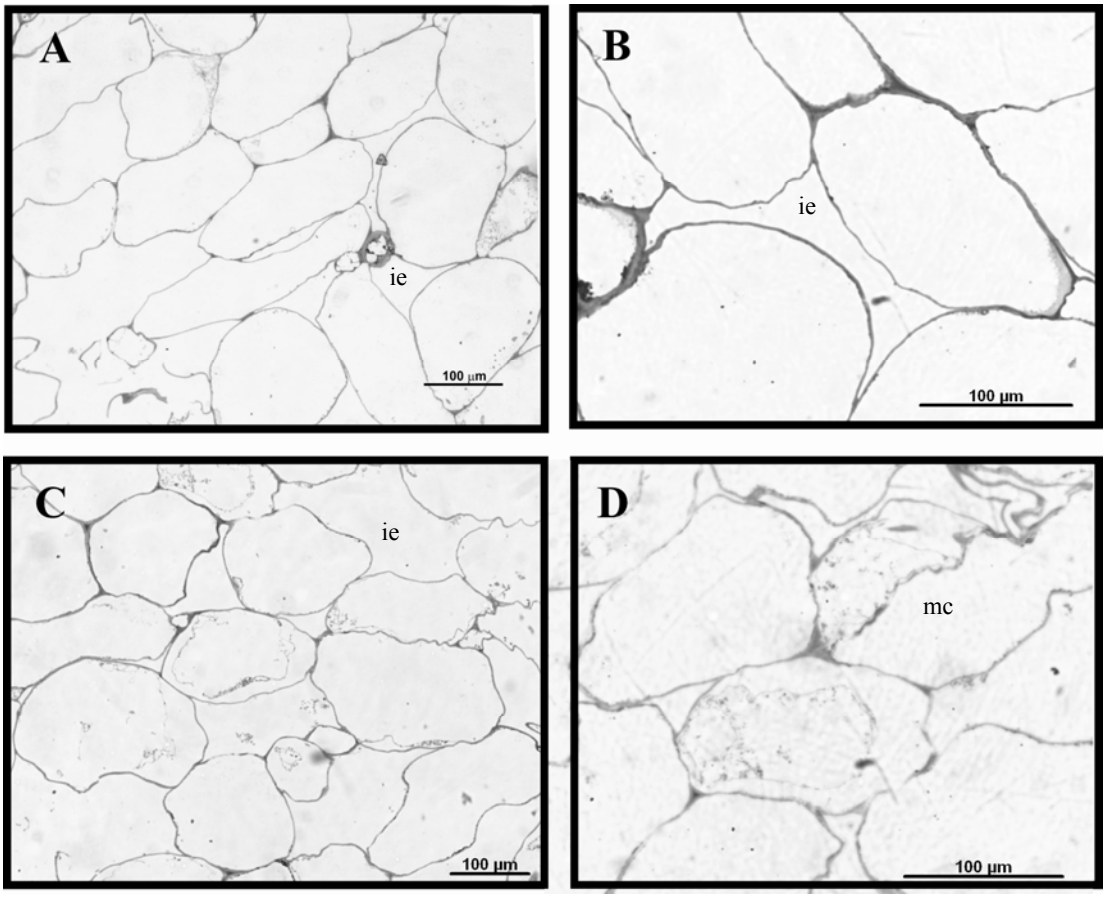


Figura 4-60. Imágenes de microscopia óptica (MO) de la superficie del tejido de manzana fresco y osmotizado en presencia de calcio. A, B: fresco (control); C, D: osmotizado. ie: espacio intercelular; mc: membrana celular.

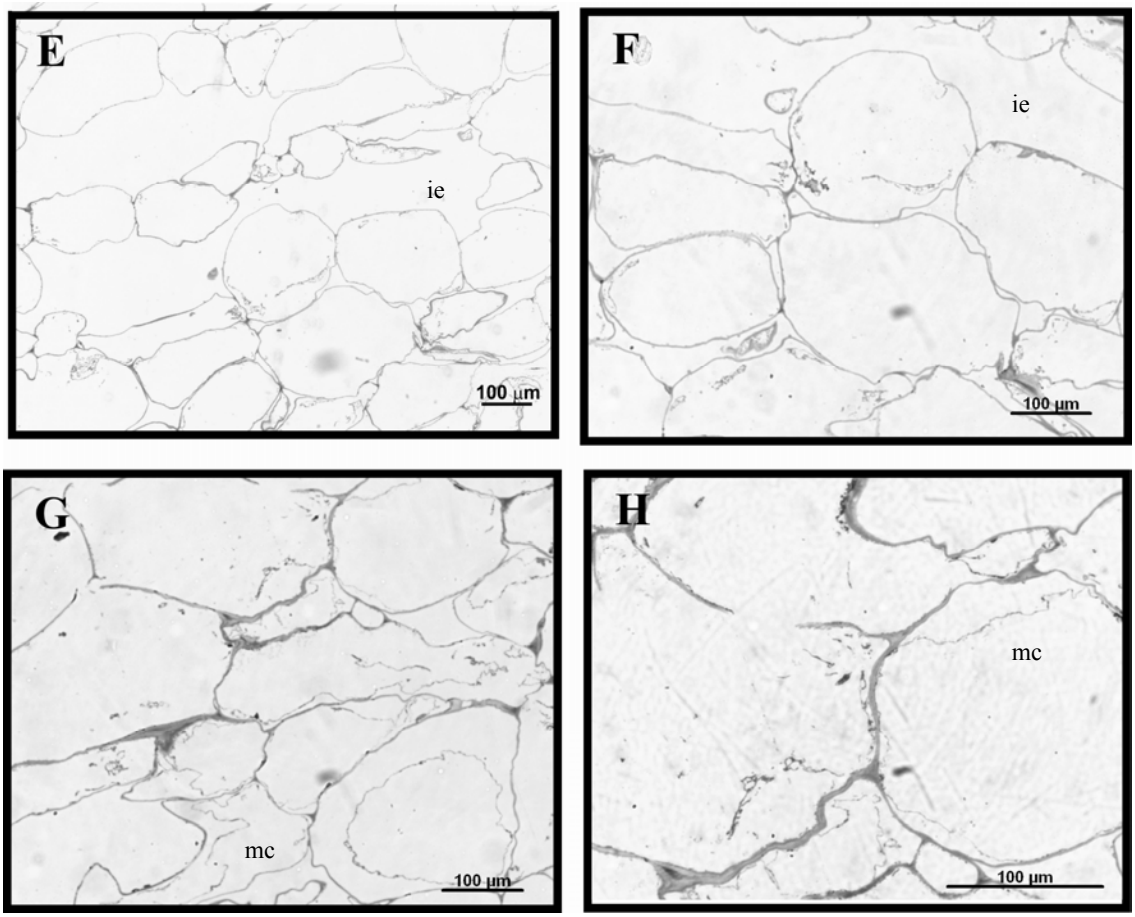


Figura 4-61. Imágenes de microscopia óptica de tejido de manzana escaldado y osmotizado con escaldado previo en presencia de calcio. E, F: escaldado 90 s; G, H: escaldado + osmotizado. ie: espacio intercelular; mc: membrana celular.

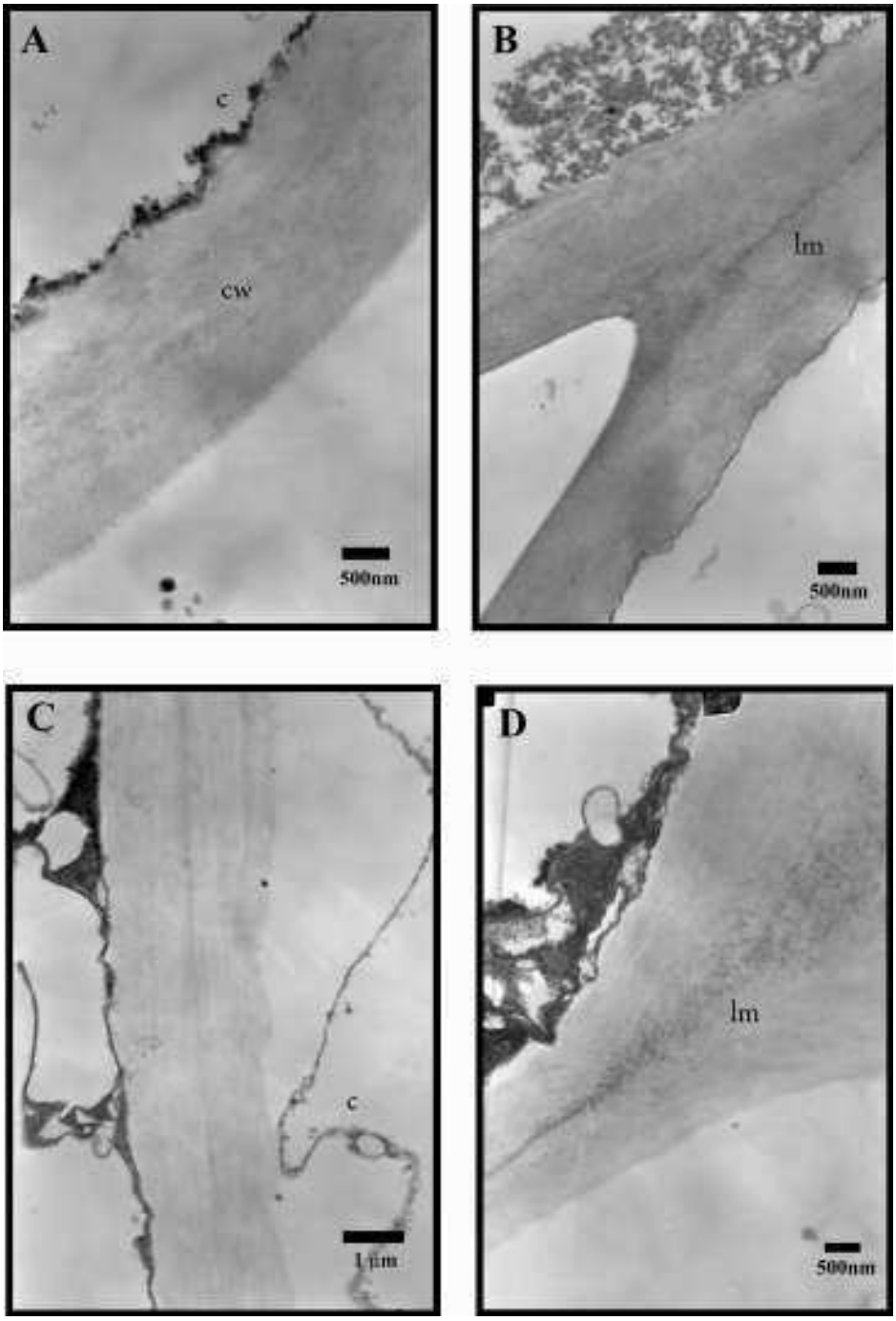


Figura 4-62. Imágenes de microscopia electrónica de transmisión de tejido de manzana fresco y osmotizado en presencia de calcio. A, B: fresco (control); C, D: osmotizado. cw: pared celular, lm: laminilla media, c: citoplasma, ve: vesícula.

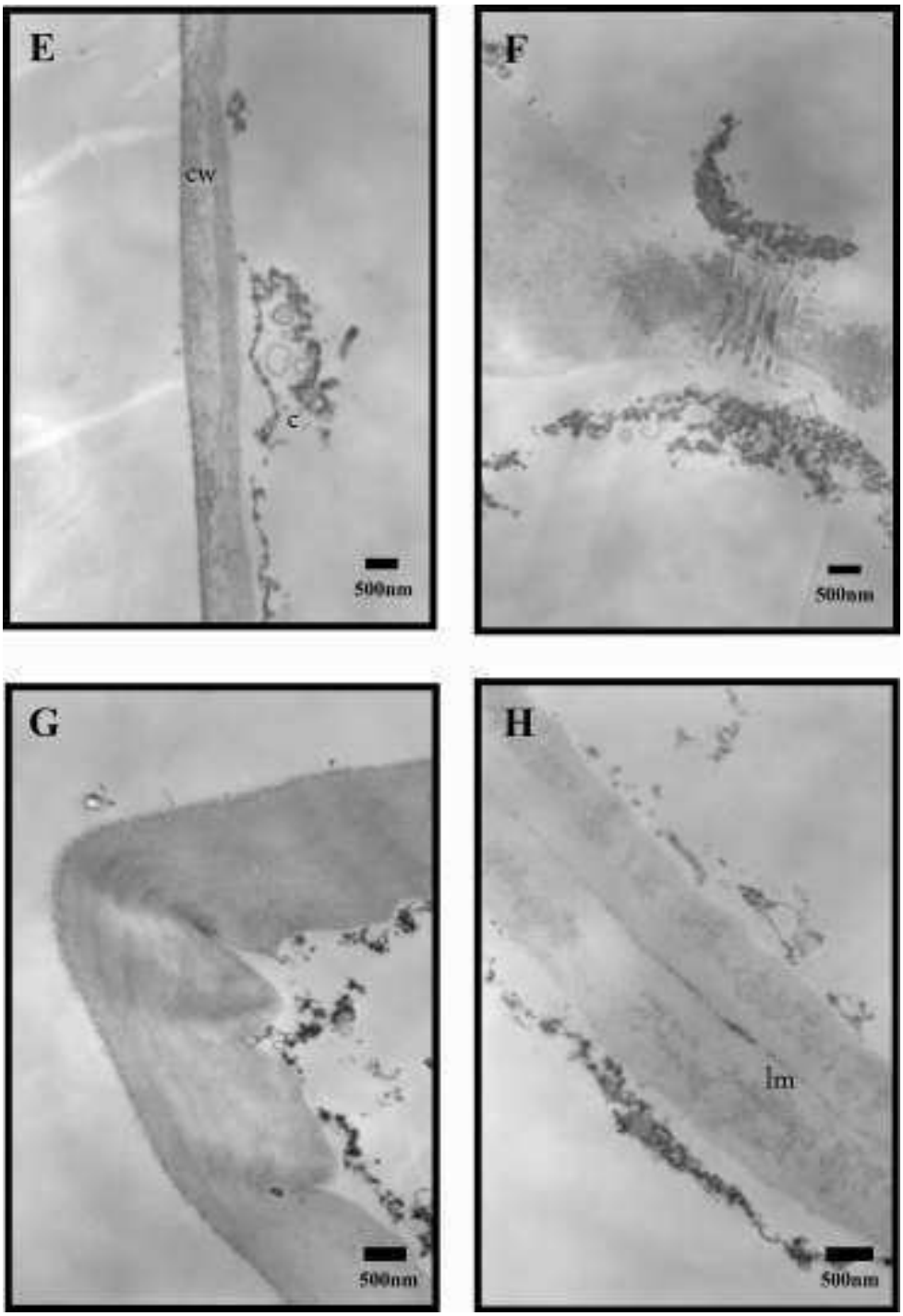


Figura 4-63. Imágenes de microscopia electrónica de transmisión de tejido de manzana escaldado y osmotizado con escaldado previo en presencia de calcio. E, F: escaldado 90 s; G, H: escaldado + osmotizado. cw: pared celular, lm: laminilla media, c: citoplasma, ve: vesícula.

4.3.4. Integración de los resultados obtenidos a través de los ensayos reológicos, la evaluación sensorial de la textura y la caracterización microestructural y ultraestructural.

Todos los ensayos realizados (ensayos oscilatorios, ensayos de fluencia-recuperación, ensayos de doble compresión y análisis sensorial de textura) fueron capaces de detectar diferencias estructurales entre las manzanas tratadas (E1, E2, DOA, E+DOA, DOA+Ca^{+2}, E+ DOA+Ca^{+2}) y la manzana fresca (C). Además permitieron detectar y explicar en mayor o menor grado diferencias estructurales entre los distintos tejidos tratados, correspondiéndose con las cambios observados a nivel micro y ultraestructural.

A nivel celular y de tejido, los tres principales elementos estructurales que contribuyen al comportamiento mecánico de frutas y vegetales son la presión de turgor (fuerza ejercida sobre la pared celular por el fluido intracelular), la rigidez de la pared celular, y la adhesión célula-célula, determinada por la integridad de la laminilla media y los plasmodesmos (Jackman & Stanley, 1995; Waldron y col., 1997; Alzamora y col., 2000). La presión de turgor conduce a la rigidez de las células y tejidos vegetales, y junto con la pared celular, proveen el soporte mecánico para mantener la forma de las células y tejidos (Alzamora y col., 2000).

Los parámetros del modelado de las curvas de fluencia y los valores del módulo de almacenamiento están asociados con algunos componentes estructurales del tejido de frutas, indicando cambios que ocurren a nivel celular cuando el tejido es procesado (Jackman y Stanley, 1995; Martínez y col., 2005, 2007; Alzamora y col., 2008). El nivel de turgencia en las células , el desplazamiento de las microfibrillas de celulosa a través de la matriz amorfa de la pared celular, el flujo de la matriz, el reagrupamiento de los componentes moleculares (especialmente la celulosa) o la combinación de estos afectan a los parámetros de fluencia y al módulo de almacenamiento (Alzamora y col., 2008). La celulosa (el principal componente de la pared celular), la presión de turgor y el aire ocluido en la matriz fueron sugeridos como responsables del comportamiento elástico de los tejidos vegetales y que influyen en los valores de G'.

Las rodajas de manzana expuestas a distintos tiempos de escaldado y/o deshidratación osmótica con o sin lactato de calcio presentaron una disminución de los módulos G' y G'' en relación con las muestras frescas (control). Estas diferencias en el espectro mecánico podrían relacionarse con una disminución de la turgencia y de los

espacios intercelulares del tejido tratado. Diversos autores han reportaron una relación lineal entre la presión de turgor y el módulo elástico en diferentes frutas y vegetales (Lin & Pitt, 1986; Jackman & Stanley, 1992; Rojas y col., 2001).

En las muestras escaldadas la disminución del módulo de almacenamiento con respecto al control fue mayor que la observada en las muestras osmotizadas con o sin escaldado previo. Esta disminución estaría asociada con alteraciones observadas en la estructura del tejido, tales como ruptura de membranas, pérdida de presión de turgor, degradación de la laminilla media y degradación parcial de las paredes celulares, con disminución del grado de adhesión célula-célula (**Figura 4-23 C,D,E y F**). En cambio, los tejidos osmotizados, que presentaron valores de los módulos más altos, mostraron su estructura menos dañada (paredes más conservadas, plasmólisis del citoplasma pero membranas mayoritariamente íntegras), aunque también exhibieron pérdida de turgor debido a la deshidratación osmótica.

Los resultados de los ensayos de fluencia-recuperación, al igual que los ensayos oscilatorios, pueden ser analizados teniendo en cuenta el modelo estructural propuesto por Alzamora y col. (2008). Estos autores adaptaron las interpretaciones realizadas por Jackman y Stanley (1995) para poder relacionar los cambios producidos en los parámetros de fluencia de tejidos de manzana y de melón con los cambios estructurales debido a distintos tratamientos. De este análisis surge que la capacitancia elástica instantánea J_0 podría relacionarse con la presión de turgor y la fuerza de la pared celular primaria dada a través de la celulosa. Las modificaciones en las capacitancias viscoelásticas J_1 y J_2 podrían atribuirse a cambios dependientes del tiempo de las pectinas y las hemicelulosas respectivamente. La viscosidad en estado estacionario η_N podría relacionarse con el incremento en la fluidez de la pared celular provocado por la solubilización y degradación de polímeros, la menor capacidad de unión de éstos con el agua y exoosmosis.

Las capacitancias J_0, J_1 y J_2 de las manzanas se incrementaron significativamente debido a los tratamientos, siendo más marcado el aumento en los tejidos tratados térmicamente (E1, E2, E+DOA, E+DOA+Ca^{+2}). Los cambios en J_0 podrían ser relacionados en parte con la pérdida de turgor y la leve plasmólisis observada en las muestras DOA y DOA+Ca^{+2}. En las muestras tratadas térmicamente estos cambios fueron más abruptos correspondiéndose con mayores aumentos en J_0, tanto más grandes cuanto más severo fue el tratamiento térmico. Las observaciones realizadas con MET para E1, E+DOA, E+DOA+Ca^{+2} denotaron paredes celulares totalmente plegadas y onduladas con poca definición de la laminilla media y degradación de microfibrillas en algunas zonas, lo

que justificaría el incremento observado en las capacitancias J_1 , J_2 y $1/\eta_N$, aumentando la fluidez de la pared celular.

Las propiedades mecánicas a grandes deformaciones del tejido de manzana fueron afectadas por los distintos tratamientos. En los tejidos deshidratados osmóticamente (DOA y DOA+Ca^{+2}) se observó un leve aumento de la dureza y fracturabilidad con respecto al tejido fresco, que podría relacionarse con la alta densidad electrónica de las paredes y del plasmalema y tonoplasto que se observó en las micrografías de MET (**Figuras 4-42 C, D y 4-62 C, D**). En cambio, el resto de los parámetros disminuyó por efecto de la deshidratación con respecto al control, asociándose estos cambios a la pérdida de la presión de turgor, la remoción del aire en los espacios intercelulares y leve plasmólisis.

En las muestras tratadas térmicamente se observaron importantes disminuciones en todos los parámetros mecánicos. Para los tratamientos E+DOA y E+DOA+Ca^{+2} no se pudo detectar la fracturabilidad en las muestras, pero se observó un ligero incremento de la dureza luego de la deshidratación osmótica. Este aumento estaría relacionado al reforzamiento observado en las paredes del tejido de manzana (**Figuras 41 G, H y 58 G, H**). El módulo de deformabilidad disminuyó considerablemente para los tejidos tratados indicando una pérdida de la rigidez correlacionada directamente con la pérdida de turgencia y remoción de aire en los espacios intercelulares.

La evaluación de textura oral denotó cambios en los tejidos tratados con respecto al control en la dureza, fracturabilidad, crujencia y jugosidad, siendo estos más relevantes en los tejidos tratados térmicamente. No se observaron cambios significativos en la cohesividad, pero los evaluadores percibían mayor cohesividad en las muestras con tratamientos más severos, es decir, tratadas térmicamente. En general las muestras osmotizadas no presentaron cambios en la dureza y fracturabilidad con respecto al control asociándose este comportamiento al reforzamiento que se observó en las paredes y en las membranas (**Figuras 4-42 C, D y 4-62 C, D**). Sin embargo, leves disminuciones fueron observadas en la crujencia y la jugosidad pudiéndose adjudicar dichos cambios a la pérdida de turgencia y reducción del aire ocluido en los espacios intercelulares.

Los tejidos tratados térmicamente presentaron importantes disminuciones en la dureza, fracturabilidad, crujencia y jugosidad correlacionando la pérdida de dureza y fracturabilidad con la ruptura y disociación de paredes celulares y degradación parcial de laminilla media, puesto de manifiesto en las micrografías por zonas alternadas de mucha menor densidad de tinción (**Figuras 4-43 G, H y 4-63 G, H**); y la disminución de crujencia con la pérdida de la presión de turgor y reducción del aire ocluido en la matriz y

solubilización y degradación de polímeros de la pared provocando una pérdida de la jugosidad.

La jugosidad es una percepción multidimensional que incluye: la fuerza con la cual el jugo es extraído, la cantidad de jugo liberada durante la masticación, las propiedades de flujo del jugo y la consistencia entre el jugo y las células en suspensión (Szczesniak y Illker, 1988). Según estos autores, para que los tejidos vegetales se perciban como jugosos, es fundamental mantener la integridad celular (membrana y pared) y la presión de turgor. Los tejidos procesados generalmente no son jugosos, aunque mantengan el porcentaje de humedad; los términos "húmedo" o "aguachento" son más adecuados para tejidos procesados. La deshidratación osmótica y el escaldado producen una pérdida parcial de la presión de turgor (menos crujencia). La pérdida selectiva de la permeabilidad de la membrana celular a través del daño causado por los tratamientos provoca un tejido colapsado con menor jugosidad

La disminución de la jugosidad fue menor en los tejidos sólo deshidratados (con o sin calcio) debido a una mayor integridad de las membranas celulares y la pared comparados a los escaldados, a pesar de la reducción en el contenido de humedad. En el caso de los deshidratados con ósmosis posterior, la ruptura importante de membranas y la reducción del contenido de humedad justificarían sus menores valores de jugosidad.

La presencia de calcio durante la deshidratación osmótica no modificó el comportamiento reológico comparado con el tejido deshidratado sin presencia de calcio, excepto en lo concerniente a sus características de fluencia, donde la incorporación de calcio se tradujo en capacitancias elástica, viscoelásticas y viscosa levemente menores. Ello podría deberse a que es necesario activar la enzima pectinmetilestereasa (PME) para incrementar la formación de puentes de calcio entre las moléculas de pectina de las paredes celulares y de la laminilla media. Para lograr la activación de dicha enzima se ha visto que es necesario un tratamiento de escaldado de bajas temperaturas – largos tiempos; este procedimiento es una práctica común utilizada para mejorar la textura de distintas frutas. Sin embargo, el objetivo de este trabajo fue utilizar la operación de escaldado como parte de un método combinado para la preservación del alimento, para inactivar o lesionar subletalmente los microorganismos presentes y destruir la actividad enzimática causante, entre otros, de la formación de aromas y sabores desagradables, como así también de cambios de color. Para ello fue necesario aplicar un tratamiento térmico a altas temperaturas durante tiempos cortos.

El análisis de regresión lineal de cuadrados mínimos parciales (PLS) encontró claras correlaciones entre los parámetros reológicos (de fluencia y mecánicos) y los atributos texturales permitiendo corroborar las relaciones antes mencionadas con la estructura del tejido de manzana. Es importante destacar que los atributos texturales en todos los tratamientos evaluados fueron mejor explicados por los parámetros de fluencia que por los parámetros del TPA.

Para las muestras escaldadas (E1 y E2), la dureza sensorial y la crujencia fueron negativamente correlacionadas con las capacitancias J_0, J_1 y J_2; y la fracturabilidad sensorial y la jugosidad fueron positivamente correlacionas con la dureza instrumental y el área 1. Estas correlaciones fueron consistentes con los cambios observados a nivel celular, es decir la pérdida de la presión de turgor y del aire ocluido en los espacios intercelulares (menor crujencia, menor DS y G'; y aumento de J_0); y alteración y degradación de la pared celular y laminilla media aumentando la fluidez de la matriz celular (menor jugosidad, menor FS y DS, menor D_1 y A_1 y aumento de J_1, J_2).

En general en las muestras deshidratadas la crujencia, la dureza sensorial y jugosidad fueron negativamente correlacionadas con las capacitancias J_0, J_1 y J_2; y positivamente correlacionadas con el módulo de deformabilidad, el área 1, el área 2 y la fracturabilidad. La fracturabilidad sensorial fue negativamente correlacionada con el parámetro viscoso η_N; y positivamente con los parámetros D_2, A_1, A_2, y F. Como era de esperar estas correlaciones se corresponden con los cambios observados a nivel celular, es decir la pérdida de la presión de turgor y del aire ocluido en los espacio intercelulares (< G', crujencia, FS, A_1, A_2 y F; y > J_0); y alteración y degradación de la pared celular (< DS, jugosidad, FS, D_2, A_1, A_2, y F; y > J_1, J_2 y $1/\eta_N$).

4.4. Efecto de los tratamientos de irradiación superficiales en las propiedades reológicas, en la textura y en la estructura

4.4.1. Aplicación de luz ultravioleta de onda corta (UV-C) en tejido de pera

En esta sección se evaluó el efecto de la luz ultravioleta combinada con pretratamientos (solución antipardeamiento y solución de peróxido de hidrogeno) sobre el tejido de pera. Los tratamientos fueron realizados según lo descripto en **Materiales y Métodos sección 3.3.2.1**. Se evaluó el efecto de la solución antipardeamiento (SA) sobre el tejido; la solución antipardeamiento con posterior irradiación de luz ultravioleta (SA+UV-C) y las soluciones antipardeamiento y de peróxido de hidrogeno con posterior irradiación de luz ultravioleta (SA+P+UV-C). Como control se evaluó el tejido fresco (C). Se determinaron las propiedades reológicas, la textura y los cambios micro y ultraestructurales del tejido de pera tratado.

4.4.1.1. Propiedades reológicas

- **Ensayos oscilatorios**

Se determinó el rango viscoelástico lineal (RVL) de las muestras mediante un barrido de amplitud con control de la deformación de cizalla (BA CDC) para deformaciones entre 0,001% y 10% utilizando una frecuencia constante (ω) de 10 s^{-1}. El valor del RVL límite para las muestras fue de 0,008 % para el control y 0,02% para las peras tratadas (**Figura 4-64**).

Los ensayos de barrido de frecuencia (BF CDC) se efectuaron a valores de frecuencia entre 100 s^{-1} y 0,1 s^{-1}, dentro del RVL recomendado por el software del equipo para las muestras frescas (0,005 %). Se utilizó este último para asegurar que todas las muestras evaluadas estuvieran dentro de los límites de linealidad

El espectro mecánico de los tejidos de pera tratados y fresco se observa en la **Figura 4-65**. Los módulos de almacenamiento (G') en todas las muestras excedieron a los valores de los módulos de pérdida (G'') a lo largo de todo el rango de frecuencia, dominando la respuesta viscoelástica.

La irradiación UV-C combinada con los pretratamientos en el tejido de pera (SA+UV-C y SA+P+UV-C) provocó una disminución en los valores del módulo de

pérdida y de almacenamiento en todas las frecuencias analizadas. Este comportamiento fue coincidente con el reportado por Gómez y col. (2011) en cilindros de manzanas pretratadas en solución antipardeamineto e irradiadas con UV-C.

Los módulos de almacenamiento y de pérdida mostraron una dependencia con la frecuencia angular. Dicha dependencia en el caso del módulo G' fue lineal. El análisis estadístico de las curvas del módulo de almacenamiento se realizó según lo detallado en **Materiales y Métodos sección 3.10** (**Tabla 4-53**). Se encontraron diferencias significativas entre las curvas de G' del control y las muestras tratadas (SA, SA+UV-C y SA+P+UV-C) y entre las curvas de SA y SA+UV-C; y SA y SA+P+UV-C. Además se encontraron diferencias significativas entre SA+P+UV-C y SA+UV-C.

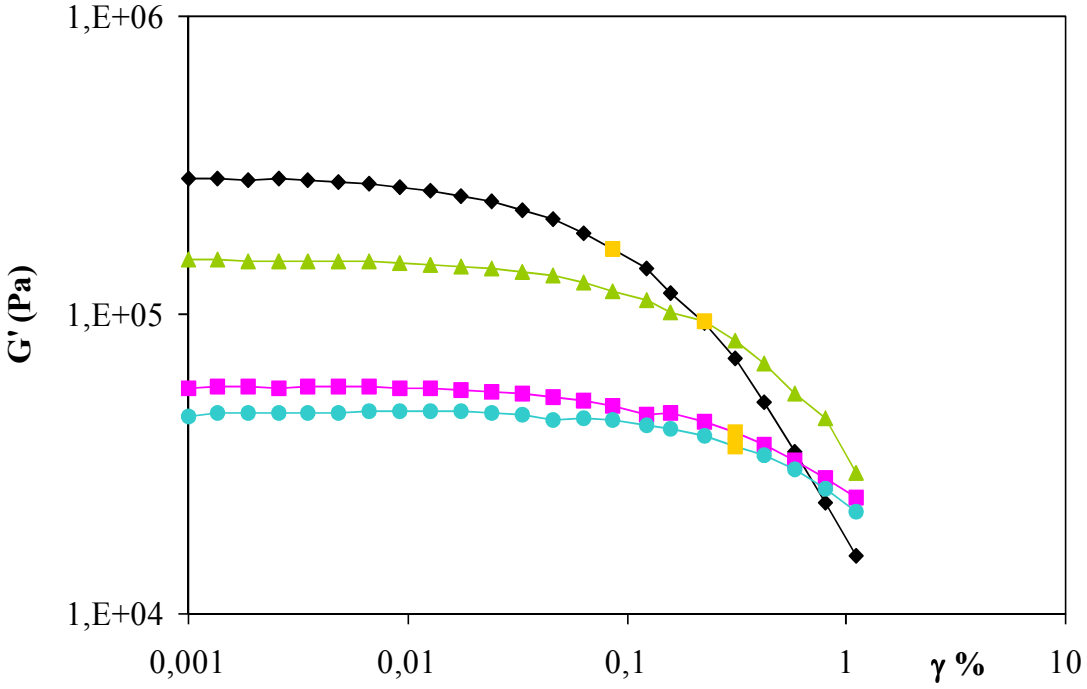


Figura 4-64. Barrido de amplitud con control de la deformación de cizalla de tejido de pera fresco, inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado (SA+UV-C), e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado (SA+P+UV-C). (♦) control, (▲) SA, (■) SA+UV-C, (●) SA+P+UV-C. (■) valor límite recomendado de RVL.

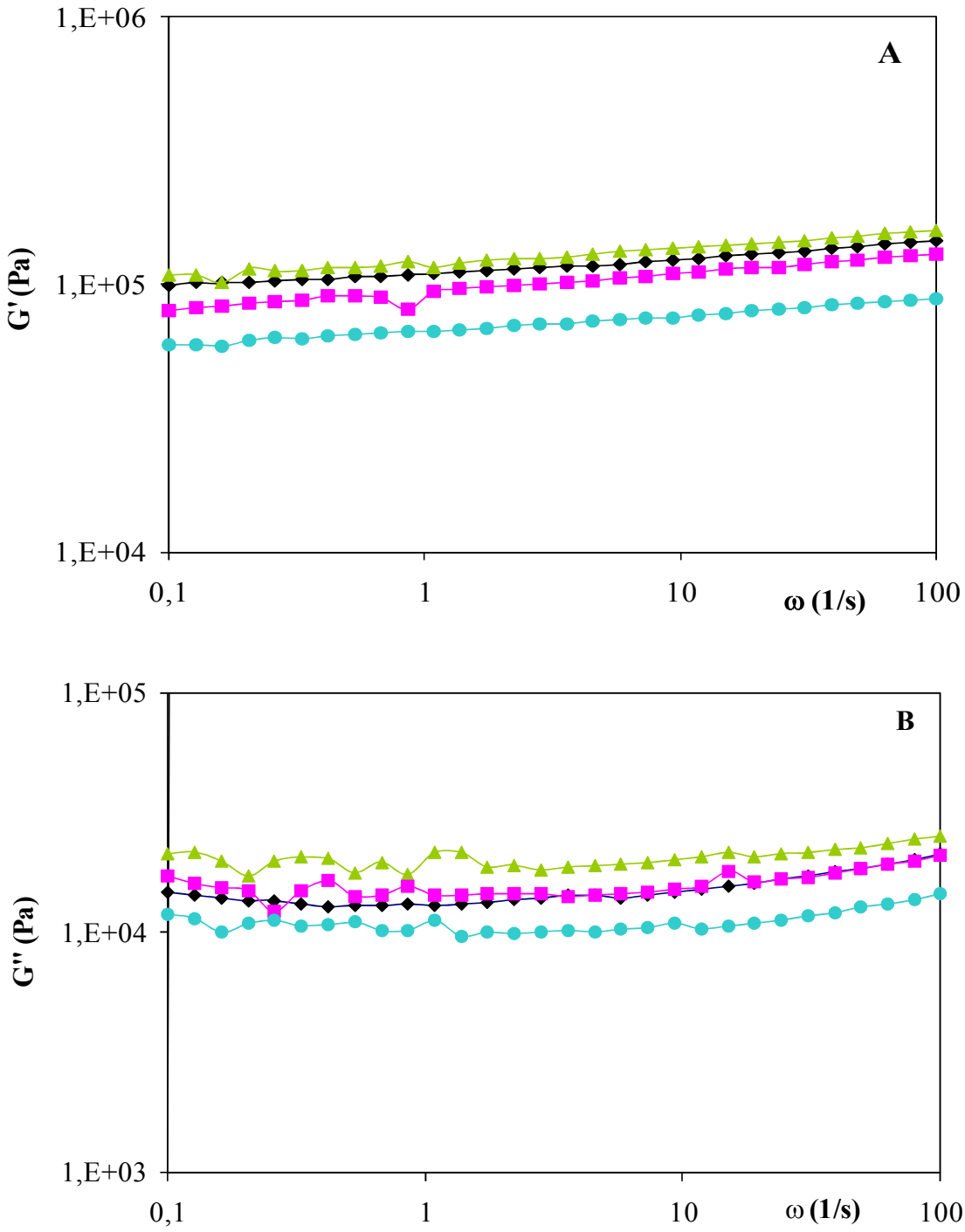


Figura 4-65. Barrido de frecuencia a γ = 0,005% en función de la frecuencia angular (ω = 100 – 0,1 s^{-1}) de tejido de pera fresco, inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento, e irradiado e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado. A) módulo de almacenamiento (G'), B) módulo de pérdida (G'') (♦) control, (▲) SA, (■) SA+UV-C, (●) SA+P+UV-C.

Al igual que en el caso de manzana, las curvas de G" mostraron un comportamiento no lineal: a bajas frecuencias G" disminuyó (0,1-1%), aumentó levemente entre 1-10 %, y a frecuencias más altas presentó un aumento gradual (10-100%). El factor de pérdida

permitió diferenciar las muestras tratadas respecto de la manzana fresca pero no fue adecuado para distinguir los tratamientos estudiados (**Figura 4-66**).

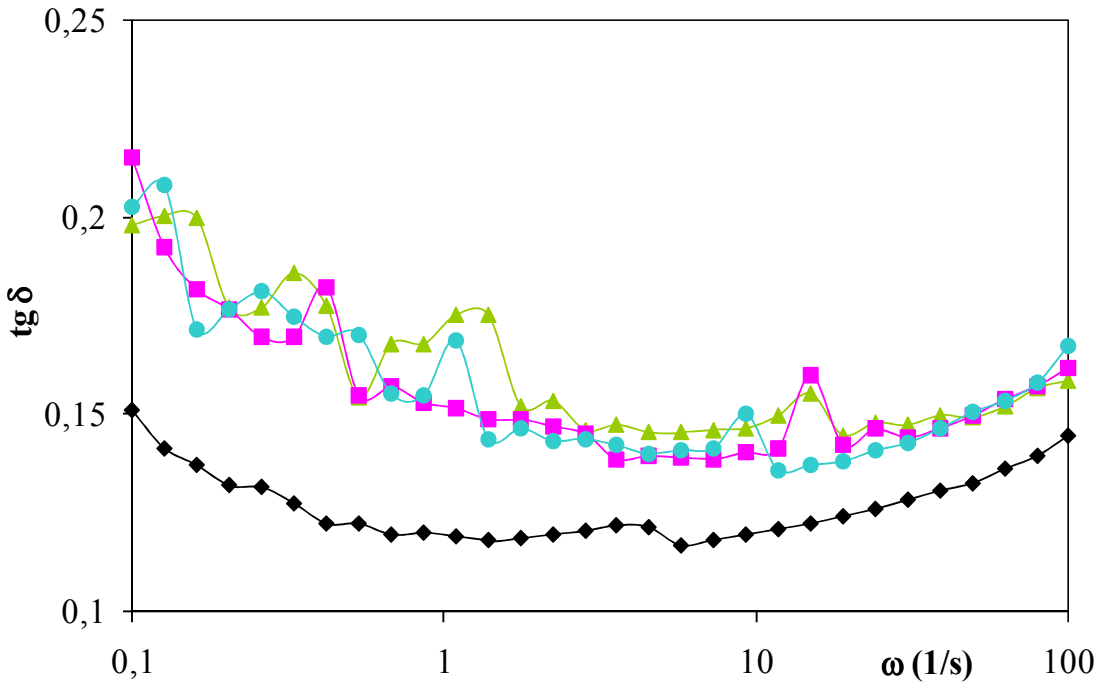


Figura 4-66. Factor de pérdida (tg δ) en función de la frecuencia angular ($\omega = 100 – 0.1\ s^{-1}$) de tejido de pera fresco, inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado, e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrogeno e irradiado. (♦) control, (▲) SA, (■) SA+UV-C, (●) SA+P+UV-C.

Tabla 4-45. Resumen del análisis de varianza de los parámetros de regresión de las curvas de G' de tejido de pera fresco, inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado, e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado.

Origen de la varianza	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio del error	Fisher
C	0,26	148	0,0017	
SA	0,77	148	0,005	
SA+UV-C	0,41	238	0,0017	
SA+P+UV-C	1,92	238	0,008	
C+SA	1,12	298	0,0037	
Σ (C+SA)	1,03	296	0,0034	12,93***
Δ [(C+SA)- Σ (C+SA)]	0,09	2	0,045	
C+(SA+UV-C)	2,13	298	0,0071	
Σ (C+(SA+UV-C))	1,77	296	0,006	35,3***
Δ [(C+(SA+UV-C))- Σ (C+(SA+UV-C))]	0,41	2	0,205	
C+(SA+P+UV-C)	4,62	298	0,015	
Σ (C+(SA+P+UV-C))	1,03	296	0,0035	516***
Δ [(C+(SA+P+UV-C))- Σ (C+(SA+P+UV-C))]	3,59	2	1,8	
SA+(SA+UV-C)	3,1	298	0,01	
Σ (SA+(SA+UV-C))	2,23	296	0,0075	57,7***
Δ [SA+(SA+UV-C)- Σ (SA+(SA+UV-C))]	0,87	2	0,73	
SA+(SA+P+UV-C)	3,1	298	0,02	
Σ (SA+(SA+P+UV-C))	2,23	296	0,005	462***
Δ [(SA+(SA+P+UV-C))- Σ (SA+(SA+P+UV-C))]	0,87	2	2,4	
(SA+UV-C)+(SA+P+UV-C)	3,82	298	0,013	
Σ (SA+UV-C)+(SA+P+UV-C)	2,23	296	0,0075	105***
Δ [(SA+UV-C)+(SA+P+UV-C)- Σ (SA+UV-C)+(SA+P+UV-C)]	1,59	2	0,8	

C+SA = Ajuste de Control +SA; Σ= suma (ajuste C + ajuste SA); Δ = Diferencia (ajuste de C+ SA – Σ); ***1% nivel de significación.

- **Ensayo de fluencia – recuperación**

El barrido de amplitud con control del esfuerzo de cizalla (BA CEC) para determinar el rango viscoelástico lineal de las muestras resultó en un RVL recomendado por el software del equipo de 70 Pa para el tejido fresco y de 50 Pa para los tejidos tratados (**Figura 4-67**).

Una vez conocido el RVL se realizaron ensayos con diferentes esfuerzos menores a 50 Pa. Se observó que aplicando un esfuerzo de 25 Pa o menos las muestras no quedaban bien sujetadas y durante el transcurso del ensayo se deslizaban, obteniéndose curvas irregulares con importantes saltos. Con un esfuerzo de 35 Pa se obtuvieron curvas regulares y reproducibles.

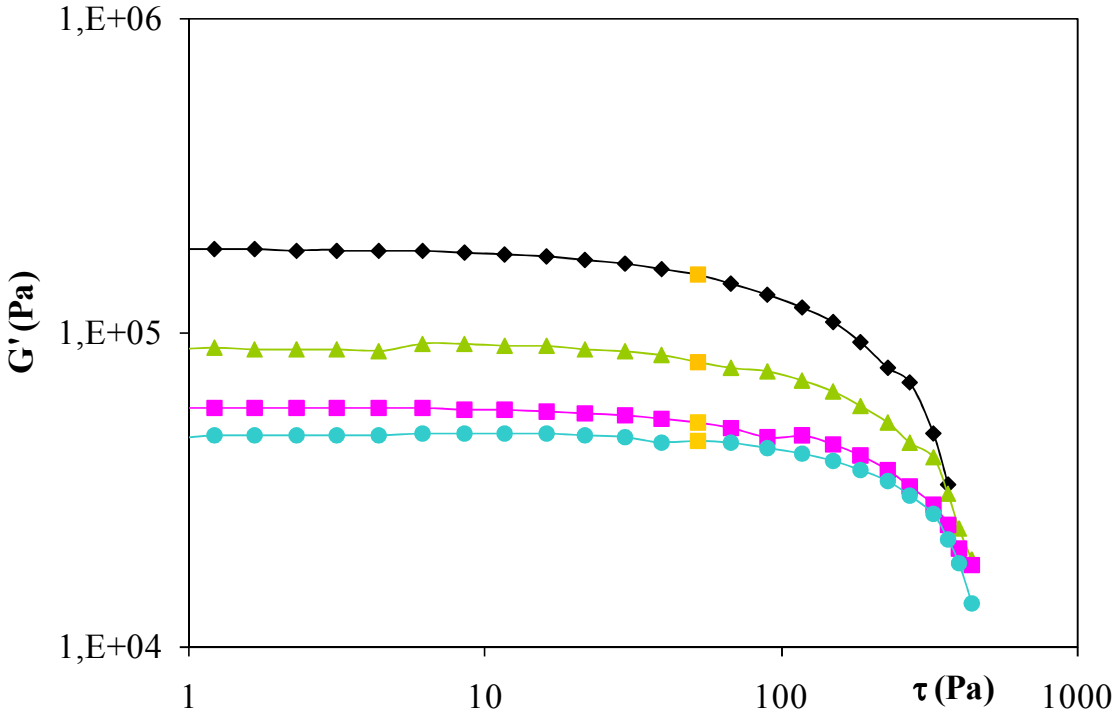


Figura 4-67. Barrido de amplitud con control del esfuerzo de cizalla de tejido de pera fresco, inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado (SA+UV-C), e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado (SA+P+UV-C). (♦) control, (▲) SA, (■) SA+UV-C, (●) SA+P+UV-C. (■) valor límite recomendado de RVL.

Las curvas experimentales promedio de deformación vs tiempo para las muestras tratadas y control se observan en la **Figura 4-68.** Las curvas mostraron una mayor deformación en el caso de los tejidos tratados, siendo esta deformación más severa cuando el tratamiento incluyó peróxido de hidrógeno.

Las curvas de capacitancia experimentales se ajustaron mediante el modelo de Kelvin Voigt generalizado (ecuación 3.5 **sección Materiales y Métodos**) obteniéndose buenos coeficientes de correlación (>0,99). En la **Figura 4-69** se observa el comportamiento de las curvas promedio modeladas de capacitancia.

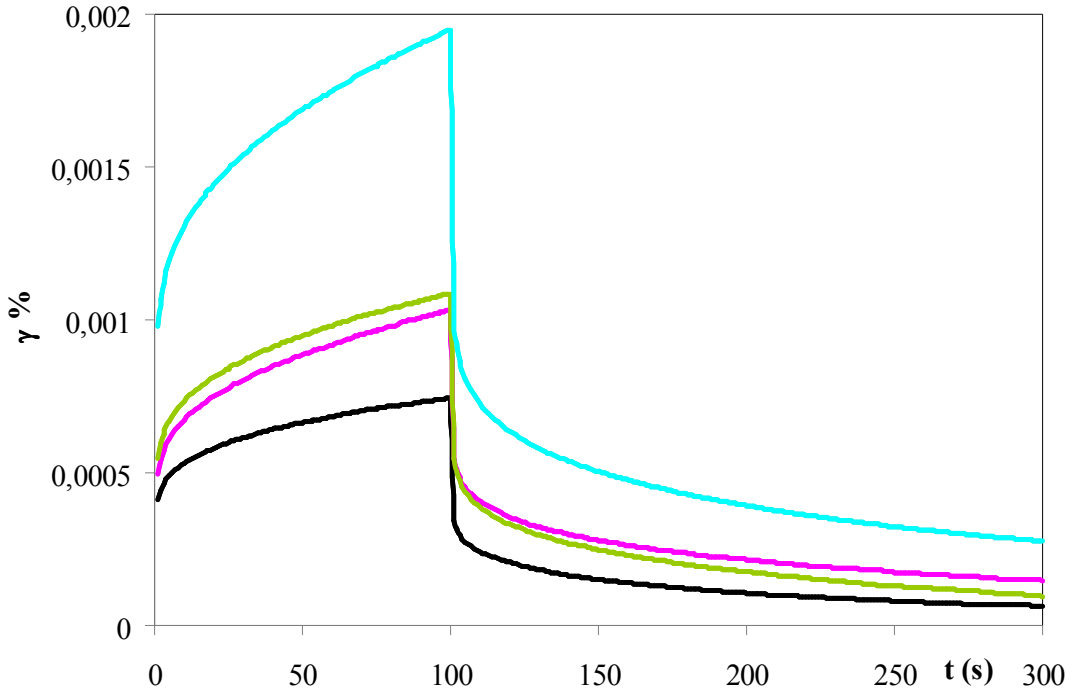


Figura 4-68. Curvas promedio de fluencia – recuperación de tejido de pera fresco, inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado, e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado. (—) control, (—) SA, (—) SA+UV-C, (—) SA+P+UV-C.

Los parámetros del modelo utilizado (J_0, J_1, J_2, λ_1, λ_2 y η_N) se muestran en la **Tabla 4-46.** El análisis de varianza multivariado para los parámetros del modelo encontró diferencias significativas ($F_{18,159} = 4,6$; $p<0,0001$) entre las muestras inmersas en SA y el control; entre las muestras inmersas en SA y peróxido de hidrógeno e irradiadas con UV-C y el control y entre las muestras tratadas entre sí.

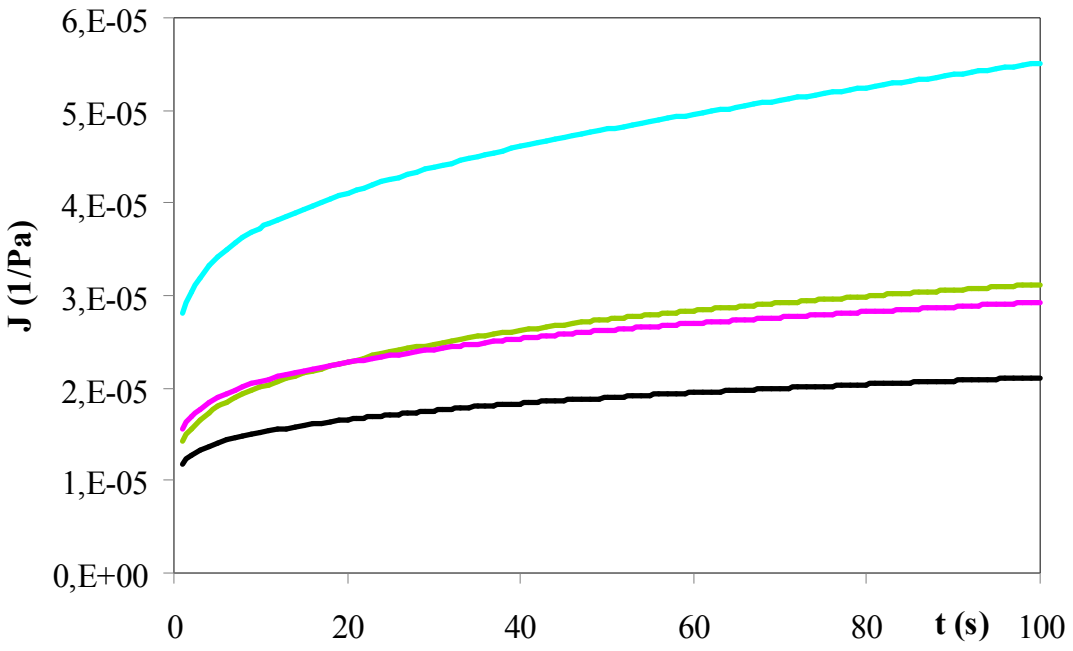


Figura 4-69. Curvas promedio de capacitancia (etapa de fluencia) de tejido de pera fresco, inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado, e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado. (▬) control, (▬) SA, (▬) SA+UV-C, (▬) SA+P+UV-C.

En general las capacitancias (instantánea (J_0), de retado (J_1 y J_2) y viscosa ($1/\eta_N$)) de los tejidos tratados aumentaron, provocando una disminución en sus respectivos módulos ($E_i = 1/J_i$). Los tiempos de retardo (λ_1 y λ_2) disminuyeron levemente con respecto al control por efecto de los tratamientos. Los aumentos observados en general fueron más marcados en los tejidos tratados con peróxido. La utilización de luz ultravioleta combinada con pretratamiento produce una pérdida de elasticidad y rigidez, y un aumento en la fluidez del tejido. Gómez (2010) no encontró diferencias significativas entre los parámetros de las curvas de fluencia de tejido de manzana fresco, pretratado con SA y pretratado con SA e irradiado con UV-C.

La contribución relativa de cada capacitancia a la capacitancia total, para el tejido de pera fresco y tratado, se encontró dentro de los siguientes rangos: 50– 40 % para J_0; 29,4 – 19 % para J_1; 14,6 - 12 % para J_2 y 22,2 – 15,5 % para $1/\eta_N$. La mayor contribución estuvo dada por la capacitancia instantánea (J_0) en todos los casos estudiados.

El aumento de la capacitancia al final de la fase de fluencia para las muestras tratadas en comparación con la muestra fresca fue de 147% para SA, de 138% para SA+UV-C y de 260% para SA+P+UV-C.

Tabla 4-46. Parámetros promedio y su correspondiente desviación estándar de las curvas de fluencia de tejido pera fresco (C), inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado (SA+UV-C), e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado (SA+P+UV-C).

Tratamiento	J_0(1/Pa) ($x10^5$)	J_1(1/Pa) ($x10^5$)	J_2(1/Pa) ($x10^5$)	λ_1(s)	λ_2 (s)	η_N (Pa.s) ($x10^{-7}$)	
C	1,1 ± 0,2 50,54**	0,46 ± 0,15 20,46**	0,29 ± 0,06 13**	26,3 ± 6,1	2,71 ± 0,56	2,77 ± 0,59 15,97**	a
SA	1,3 ± 0,4 40,01**	0,59 ± 0,18 29,46**	0,39 ± 0,13 12,2**	22,2 ± 5,4	2,28 ± 0,67	1,68 ± 0,97 18,27**	b
SA+UV-C	1,5 ± 0,5 47,65**	0,67 ± 0,26 22,23**	0,44 ± 0,18 14,6**	24,9 ± 5,7	2,51 ± 0,48	2,27 ± 1,84 15,5**	c
SA+P+UV-C	2,4 ± 0,5 45,46**	1,1 ± 0,27 19,03**	0,7 ± 0,2 13,4**	23,8 ± 2,7	2,57 ± 0,27	0,85 ± 0,19 22,04**	d

* Parámetros obtenidos a partir de la ecuación 3-5.
** Contribución relativa de cada tipo de capacitancia a la capacitancia total al final de la etapa de fluencia.
Tratamientos con igual letra no presentan diferencias significativas con un 95 % de nivel de confianza. .

Con el análisis de componentes principales (PCA) se estudió la relación entre las muestras y las variables. Teniendo en cuenta las dos componentes principales se explicó el 99% de la variabilidad entre las muestras (**Tabla 4-47**). Las **Tablas 4-48 y 4-49** indican el peso de las variables sobre cada componente**.** La CP 1 explicó el 68,3% a través de los cambios producidos en las capacitancias (J_0, J_1, J_2) y el parámetro η_N, mientras que la CP 2 explicó el 30,8% de la variabilidad asociada a los tiempos de retardo λ_1 y λ_2.

Analizando el gráfico obtenido para la CP 1 y CP 2 (**Figura 4-70**) puede verse claramente cómo la luz ultravioleta combinada con la solución antipardeamiento y el peróxido de hidrógeno afectó las propiedades viscoelástica del tejido de pera. La muestra SA+P+UV-C fue colocada en el cuadrante negativo de la CP 1 debido a que el tratamiento provocó un aumento en las capacitancias (J_0, J_1 y J_2) y una disminución en el coeficiente viscoso (η_N), mientras que las muestras SA y SA+UV-C fueron ubicadas en el cuadrante positivo porque el efecto del tratamiento no fue tan severo modificando en menor proporción las capacitancias.

Analizando la CP 2, las muestras SA+P+UV-C, SA+UV-C y C fueron ubicadas en el cuadrante positivo mientras que la muestra SA fue ubicada en el cuadrante negativo indicando un disminución más relevante en los tiempos de retardo.

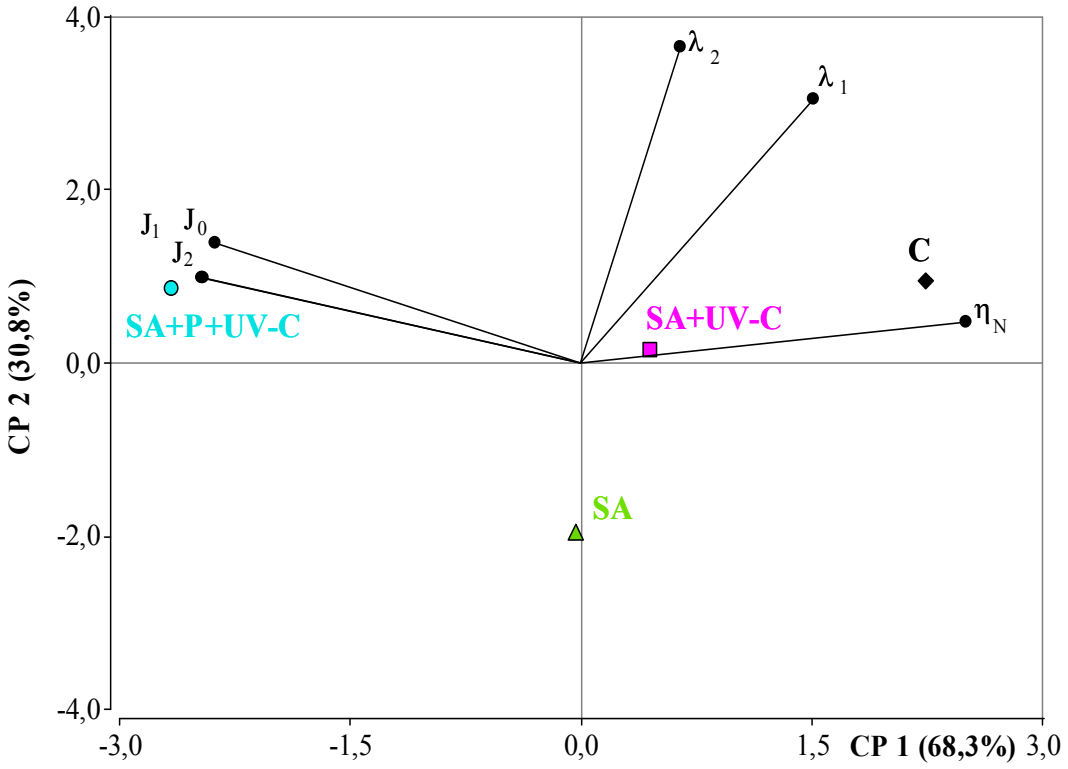


Figura 4-70. Análisis de componentes principales para los parámetros de las curvas de capacitancia de la fase de fluencia de tejido de pera fresco y tratado. (♦) control (C), (▲) inmerso en solución antipardeamiento (SA), (■) inmerso en solución antipardeamiento e irradiado (SA+UV-C), (●) inmerso en solución antipardeamiento, peróxido hidrógeno e irradiado (SA+P+UV-C).

Tabla 4-47, 4-48 y 4-49. Autovalores, autovectores y correlaciones correspondientes al análisis PCA de los parámetros de la curvas de capacitancia de la fase de fluencia de tejido de pera fresco, inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado, e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrogeno e irradiado.

Autovalores			
CP	Valor	Proporción	Prop. Acum.
1	4,1	0,68	0,68
2	1,85	0,31	0,99

Autovectores		
Variables	CP 1	CP 2
J_0	-0,46	0,27
J_1	-0,48	0,19
J_2	-0,48	0,19
λ_1	0,29	0,59
λ_2	0,12	0,71
η_N	0,48	0,09

Correlaciones con las variables originales		
Variables	CP 1	CP 2
J_0	-0,93	0,37
J_1	-0,96	0,26
J_2	-0,96	0,26
λ_1	0,59	0,8
λ_2	0,25	0,96
η_N	0,98	0,12

Valor en rojo representa la variable(s) más relevante(s) de la componente principal.

- **Ensayos de doble compresión**

Las curvas experimentales de los ensayos de doble compresión para las muestras tratadas y control se observan en la **Figura 4-71**. Las curvas de los tejidos tratados y fresco presentaron un pico abrupto al comienzo del ensayo y uno más leve al final de la primera compresión, indicando que la dureza y la fracturabilidad fueron coincidentes. Tanto la inmersión en la solución antipardeamiento como el tratamiento de UV-C combinado con pretratamientos previos provocaron una disminución en los picos máximos. La literatura informa efectos contradictorios debido a estos tratamientos. Dong y col. (2000) reportaron una pérdida de firmeza en cilindros de pera (Anjou) que fueron tratados con una solución de 1 % (p/v) de acido ascórbico y 1% (p/v) de lactato de calcio. Zhu y col. (2007) reportaron que la inmersión de cubos de manzana en la misma solución durante 5 minutos provocó una disminución de la firmeza en el tejido. A diferencia de estos autores, Gómez (2010) no encontró cambios importantes en las propiedades reológicas a altas deformaciones por la aplicación de la solución de ácido ascórbico/cloruro de calcio en tejido de manzana.

A partir de las curvas obtenidas se calcularon los parámetros mecánicos para cada muestra (**Tabla 4-50**). Se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos y el control ($F_{30,183}$ = 4,86; p<0,0001). No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos SA+UV-C y SA+P+UV-C.

En las muestras tratadas se observaron disminuciones en todas las propiedades mecánicos, siendo éstas más pronunciadas en las muestras tratadas con luz ultravioleta. El módulo de deformabilidad disminuyó considerablemente para los tejidos tratados indicando una pérdida de la rigidez.

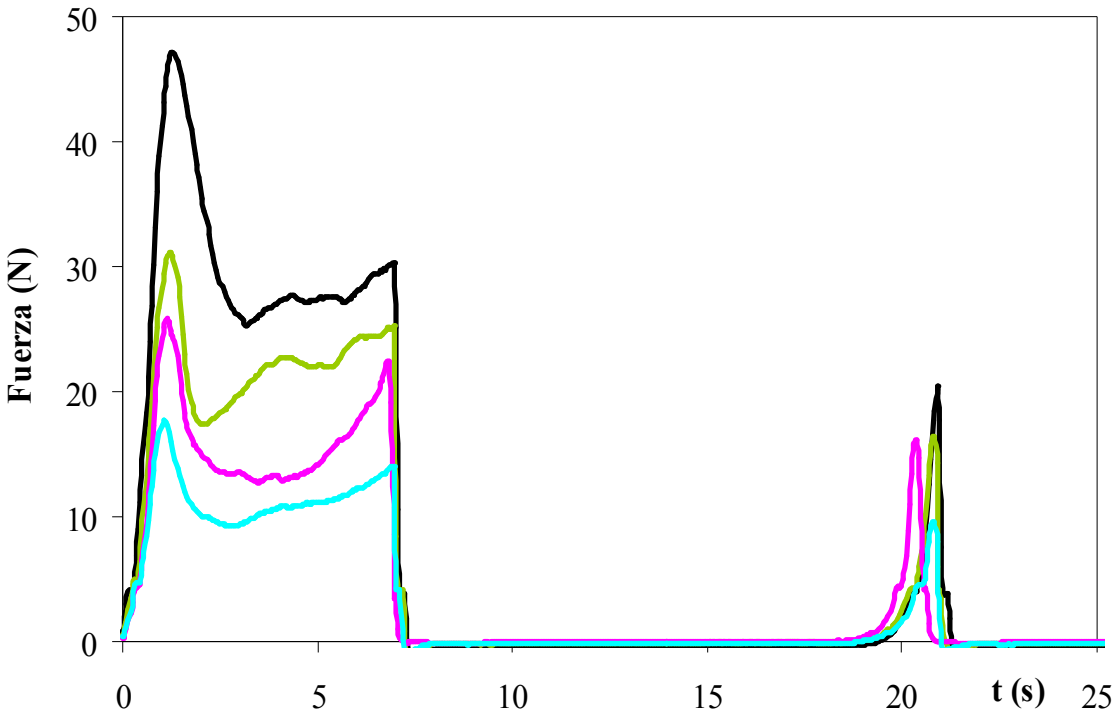


Figura 4-71. Curvas típicas de doble compresión de tejido de pera fresco, inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado, e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado. (—) control, (—) SA, (—) SA+UV-C, (—) SA+P+UV-C.

El análisis de componentes principales para los parámetros mecánicos con las muestras (**Figura 4-72**) explicó el 99 % de la variabilidad de los datos considerando las dos primeras componentes principales (**Tabla 4-51**). La CP 1 (89,5%) fue explicada por las diferencias encontradas en la fracturabilidad, la dureza en la primera compresión, la dureza en la segunda compresión, el área de trabajo en la primera compresión, el área de trabajo en la segunda compresión, la elasticidad, la gomosidad, la masticabilidad y el módulo de deformabilidad. El 10% faltante fue explicado por la CP 2 a través de los cambios en la cohesividad (**Tabla 4-52 y 4-53)**. Analizando la ubicación de las muestras en el gráfico puede notarse que las muestras tratadas con luz ultravioleta fueron ubicadas en el cuadrante negativo de la CP 1 indicando la disminución de sus características mecánicas

Tabla 4-50. Parámetros mecánicos promedio y su correspondiente desviación estándar de las curvas de doble compresión de tejido de pera fresco (C), inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado (SA+UV-C), e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrogeno e irradiado (SA+P+UV-C).

Tratamiento	Fracturabilidad (N)	Dureza (N)	Dureza 2 (N)	Área 1 (J)	Área 2 (J)	Elasticidad (-)	Cohesividad (-)	Gomosidad (N)	Masticabilidad (N)	E_d (N/mm^2)	
C	39,5 ± 8,1	39,5 ± 8,1	15,2 ± 3,9	0,14 ± 0,03	0,011 ± 0,002	0,22 ± 0,04	0,04 ± 0,01	1,5 ± 0,5	0,35 ± 0,18	0,55 ± 0,12	a
SA	24,1 ± 8,4	24,1 ± 8,4	11,6 ± 3,6	0,09 ± 0,03	0,004 ± 0,001	0,18 ± 0,03	0,04 ± 0,01	1,04 ± 0,39	0,2 ± 0,1	0,35 ± 0,15	b
SA+UV-C	19,2 ± 5,9	19,2 ± 5,10	9,2 ± 3,2	0,08 ± 0,02	0,003 ± 0,001	0,16 ± 0,03	0,04 ± 0,02	0,71 ± 0,36	0,12 ± 0,08	0,18 ± 0,07	c
SA+P+UV-C	16,29 ± 3,97	16,29 ± 3,98	8,65 ± 1,73	0,07 ± 0,01	0,0031 ± 0,0005	0,17 ± 0,03	0,04 ± 0,03	0,72 ± 0,15	0,12 ± 0,04	0,15 ± 0,03	c

Tratamientos con igual letra no presentan diferencias significativas con un 95 % de nivel de confianza.

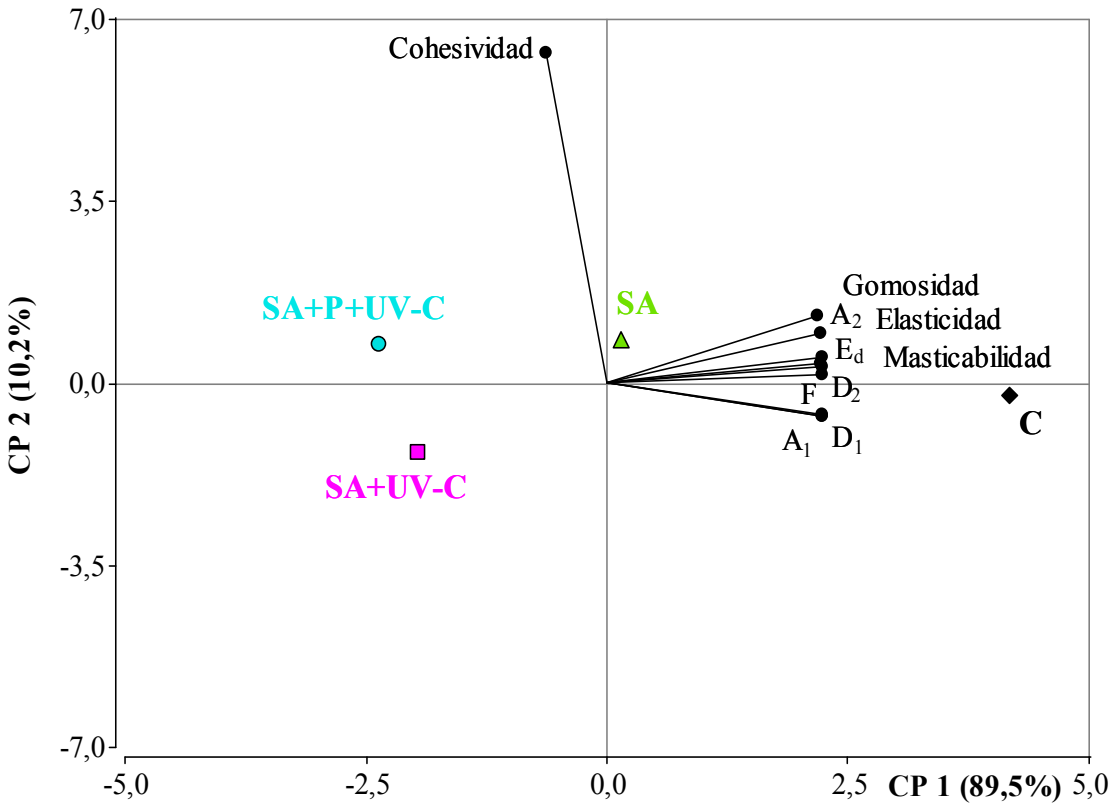


Figura 4-72. Análisis de componentes principales para los parámetros de las curvas de doble compresión de tejido de pera fresco y tratado. (♦) control (C), (▲) inmerso en solución antipardeamiento (SA), (■) inmerso en solución antipardeamiento e irradiado (SA+UV-C), (●) inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado (SA+P+UV-C).

Tabla 4-51, 4-52 y 4-53. Autovalores, autovectores y correlaciones correspondientes al análisis PCA de los parámetros mecánicos de tejido de pera fresco, inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado, e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado.

Autovalores			
CP	Valor	Proporción	Prop Acum
1	8,95	0,895	0,895
2	1,02	0,102	0,997

Autovectores		
Variables	CP 1	CP 2
Fracturabilidad (F)	0,333	-0,094
Dureza (D_1)	0,333	-0,093
Dureza 2 (D_2)	0,333	0,027
Area 1 (A_1)	0,333	-0,09
Area (A_2)	0,33	0,146
Elasticidad	0,326	0,195
Cohesividad	-0,094	0,95
Gomosidad	0,333	0,076
E_d	0,333	0,047
Masticabilidad	0,332	0,059

Correlaciones con las variables originales		
Variables	CP 1	CP 2
Fracturabilidad (F)	0,995	-0,095
Dureza (D_1)	0,995	-0,094
Dureza 2 (D_2)	0,998	0,027
Area 1 (A_1)	0,996	-0,091
Area (A_2)	0,988	0,147
Elasticidad	0,975	0,197
Cohesividad	-0,282	0,96
Gomosidad	0,997	0,077
E_d	0,998	0,048
Masticabilidad	0,994	0,059

Valor en rojo representa la variable(s) más relevante(s) de la componente principal.

4.4.1.2. Análisis sensorial de textura

Se evaluó la textura oral en las muestras tratadas y control a través de los parámetros dureza, fracturabilidad y jugosidad con el panel altamente entrenado. La adhesividad al paladar y la crujencia no se consideraron ya que los evaluadores no percibieron dicha propiedad en los tejidos tratados y fresco. Con respecto a la cohesividad, los evaluadores no percibieron cambios entre las muestras, ya que los tratamientos utilizados tuvieron efecto a nivel superficial. En la **Tabla 4-54** se detallan los resultados obtenidos de las evaluaciones sensoriales.

Tabla 4-54. Parámetros texturales promedio y su correspondiente desviación estándar del análisis sensorial de tejido pera fresco (C), inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado (SA+UV-C), e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado (SA+P+UV-C).

Tratamiento	Dureza	Fracturabilidad	Jugosidad
C	4,83±0,72[a]	4,41±2,01[a]	4,92±1,01[a]
SA	4,55±1,12[a]	3,89±1,75[a]	4,99±0,74[a]
SA+UV-C	4,31±0,65[a]	3,91±2,19[a]	5,33±1,4[a]
SA+P+UV-C	4,18±0,65[a]	3,7±2,28[a]	5,23±0,61[a]

Medias de una misma columna con igual letra no presentan diferencias significativas con un 95 % de nivel de confianza.

Los tratamientos evaluados en el tejido de pera no afectaron significativamente la textura oral. No se encontraron diferencias significativas para dureza ($F_{3,15}$=2,35; p = 0,1), fracturabilidad ($F_{3,18}$=2,83; p = 0,0530) y jugosidad ($F_{3,15}$=0,48; p = 0,78) entre las muestras tratadas y el control. Los juicios emitidos por el panel para la dureza y la

jugosidad fueron consistentes y homogéneos ($F_{5,15}$ = 2,58 y $F_{5,15}$ = 2,02 respectivamente). En cambio, se observó una gran dificultad entre los panelistas para evaluar la fracturabilidad en este tipo de muestras, por ende los juicios emitidos no fueron homogéneos ($F_{6,18}$ = 63,1; p<0,0001).

En la **Figura 4-73** se observa el Perfil de Textura sensorial obtenido para el tejido de pera fresco y tratado indicando que las muestras tratadas se mostraron menos duras y fracturables; y más jugosas con respecto al control, si bien las diferencias no fueron significativas.

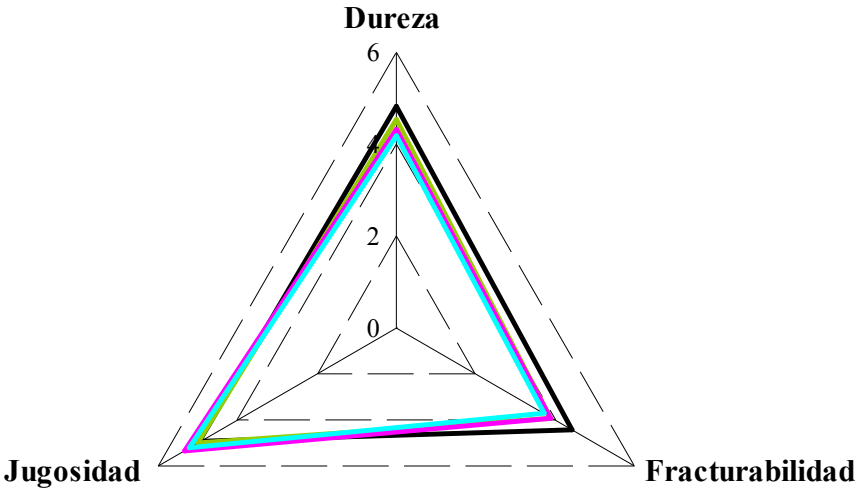


Figura 4-73. Perfil de Textura de tejido de pera fresco, inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado, e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado. (▬) control, (▬) SA, (▬) SA+UV-C, (▬) SA+P+UV-C.

4.4.1.3. Correlación entre las propiedades reológicas y la textura utilizando regresión lineal de cuadrados mínimos parciales

Para correlacionar los atributos texturales con las propiedades reológicas se utilizó el análisis de regresión lineal por cuadrados mínimos parciales.

4.4.1.3.1. Propiedades mecánicas (TPA)

Se utilizaron los atributos texturales dureza (DS), fracturabilidad (FS) y jugosidad como variables Y o dependientes, y las parámetros obtenidos del TPA (dureza, fracturabilidad, dureza 2, área 1, área 2, cohesividad, elasticidad, gomosidad, masticabilidad y modulo de deformabilidad) como variables X o independientes.

El modelo de regresión de cuadrados mínimos parciales con seis factores logró explicar el 64,1 % de la variabilidad de los atributos texturales a través de los parámetros instrumentales. El factor PLS 1 logró explicar el 15 %, el factor PLS 2 el 17 %, el factor PLS 3 el 8,9 %, el factor PLS 4 el 6,9 %, el factor PLS 5 el 4,5 % y el factor 6 el 11,4 %.

Analizando el modelo propuesto, el atributo mejor explicado fue dureza sensorial (21,8 % de la varianza explicada) mientras que la fracturabilidad y jugosidad (7,7 % y 5,7 % de la varianza explicada respectivamente) fueron menos explicados (**Figura 4-74**). Los bajos porcentajes observados se explican a través de las pocas diferencias encontradas entre las muestras en los atributos texturales.

Las correlaciones entre las variables sensoriales e instrumentales se observan en la **Figura 4-75**. Analizando la ubicación de las variables observamos que el módulo de deformabilidad (E_d) está positivamente relacionado con la dureza y fracturabilidad sensorial; y negativamente relacionado con la jugosidad.

En **Figura 4-76** no se observó una tendencia en la ubicación de las muestras de pera en función las los factores PLS 1 y PLS 2. Este comportamiento era esperado dadas las pocas diferencias encontradas en los atributos texturales de las muestras de pera.

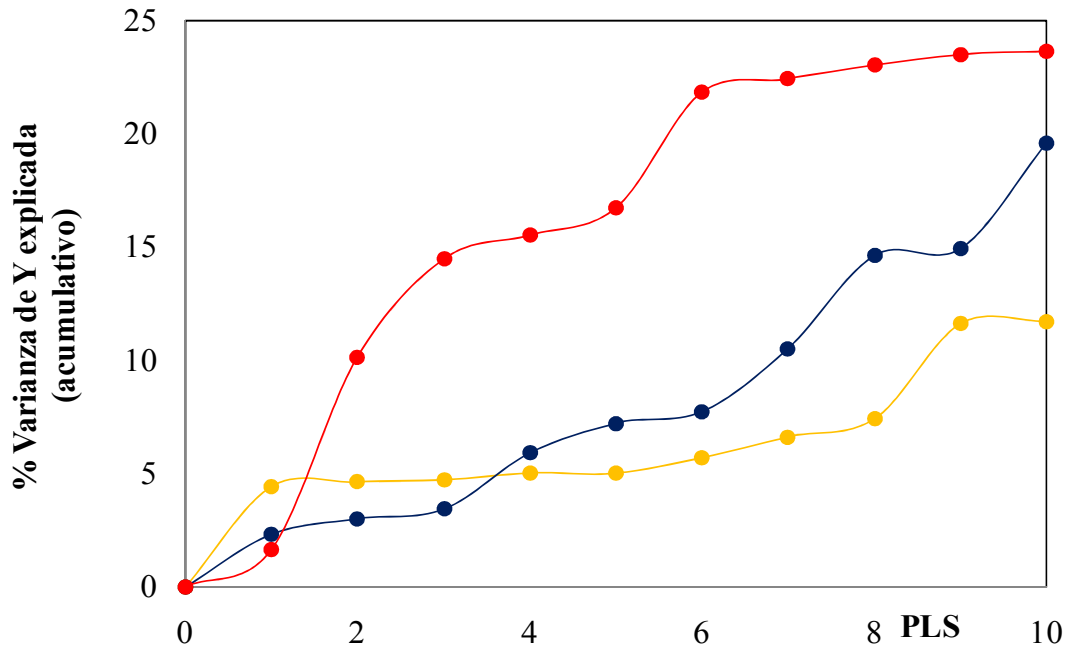


Figura 4-74. Porcentaje de varianza de los atributos sensoriales explicada por los parámetros mecánicos de tejido de pera fresco, inmerso en solución antipardeamiento, inmersa en solución antipardeamiento e irradiado con UV-C e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado con UV-C. (—) dureza, (—) jugosidad, (—) fracturabilidad.

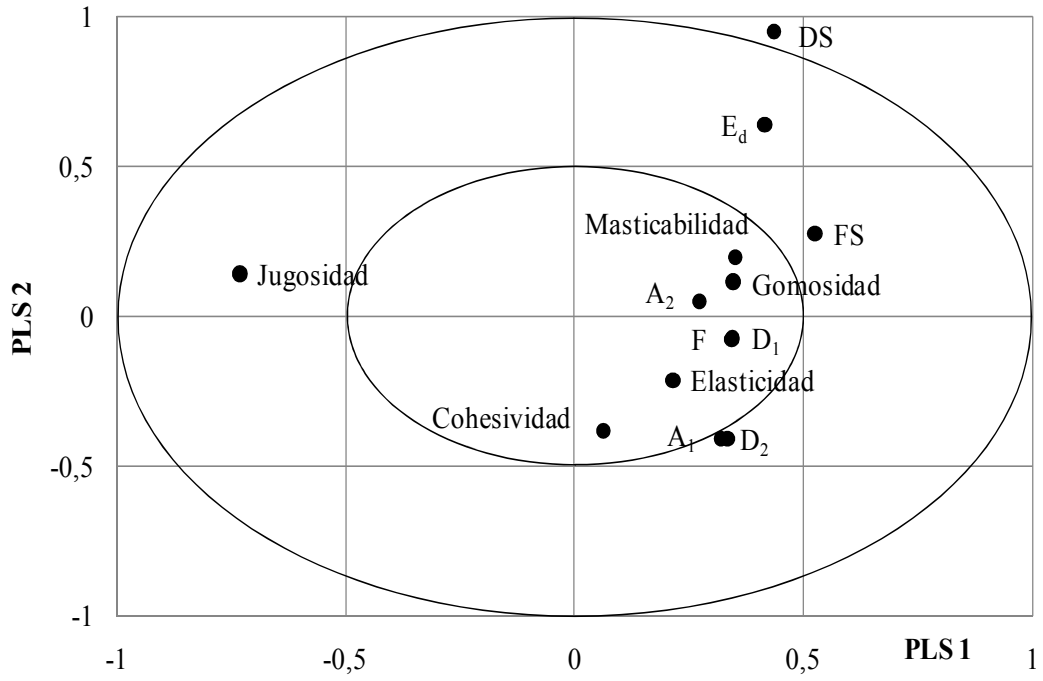


Figura 4-75. Correlación entre las variables del TPA y los atributos sensoriales de tejido de pera fresco, inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con UV-C e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado con UV-C.

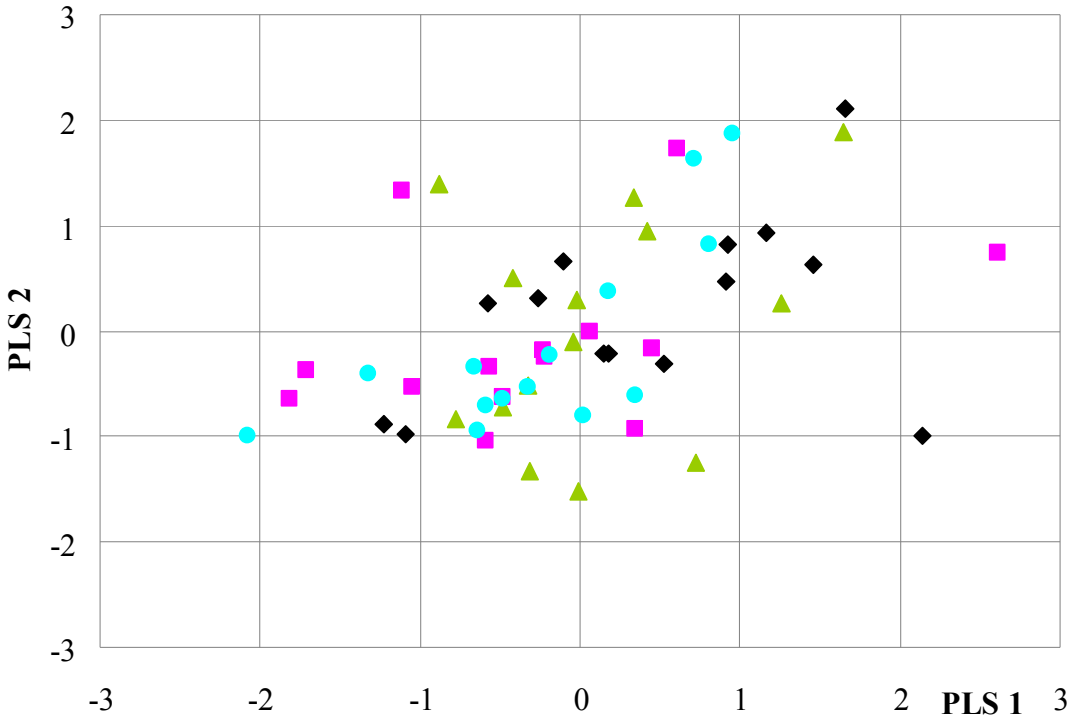


Figura 4-76. Ubicación del tejido de pera fresco y tratado en función de la PLS 1 vs PLS 2. (♦) control (C), (▲) inmerso en solución antipardeamiento (SA), (■) inmerso en solución antipardeamiento e irradiado (SA+UV-C), (●) inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado (SA+P+UV-C).

4.4.1.3.2. Parámetros de fluencia

Se analizó la correlación entre los parámetros de las curvas de fluencia (variables independientes) y los atributos texturales (variables dependientes).

El modelo de regresión de cuadrados mínimos parciales con cinco factores logró explicar el 78,9 % de la variabilidad de los atributos texturales a través de los parámetros instrumentales. El factor PLS 1 logró explicar el 20,7 %, el factor PLS 2 el 17,5 %, el factor PLS 3 el 6,5 %, el factor PLS 4 el 8 % y el factor PLS 5 el 26,2 %.

Analizando el modelo propuesto, el atributo mejor explicado fue jugosidad (13,1 % de la varianza explicada) mientras que la fracturabilidad y dureza (1,9 % y 6,7 % de la varianza explicada respectivamente) fueron menos explicados (**Figura 4-77**). Los bajos porcentajes observados se explican a través de las pocas diferencias encontradas entre las muestras en los atributos texturales.

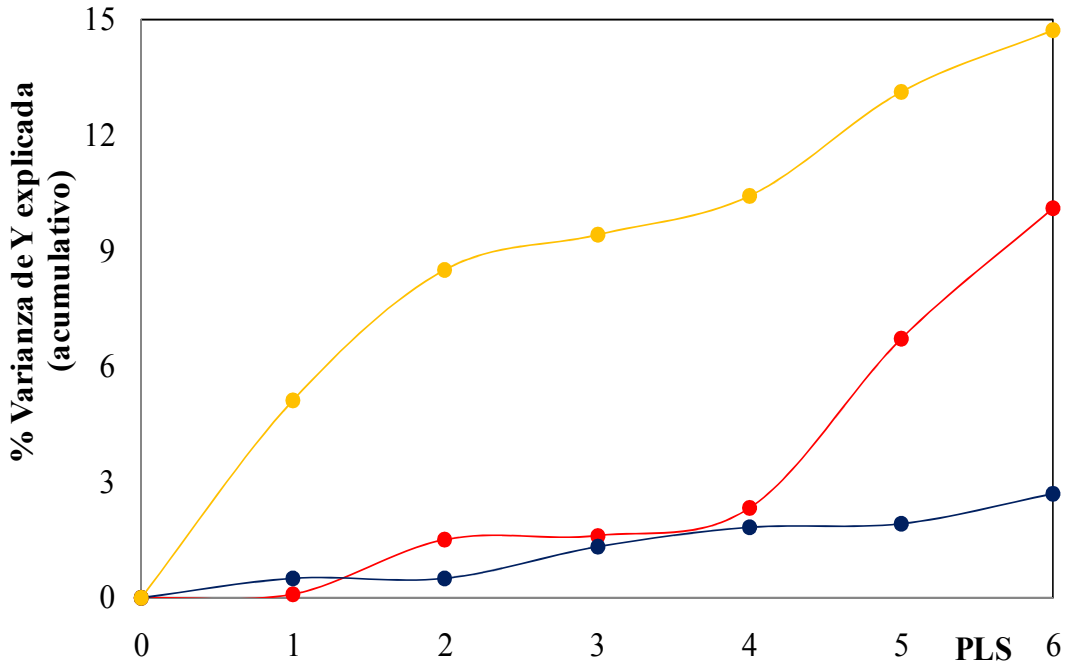


Figura 4-77. Porcentaje de varianza de los atributos sensoriales explicada por los parámetros de fluencia de tejido de pera fresco, inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con UV-C y inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrogeno e irradiado con UV-C. (—) dureza, (—) jugosidad, (—) fracturabilidad.

Las correlaciones entre las variables sensoriales e instrumentales se observan en la **Figura 4-78**. Analizando la ubicación de las variables a través del eje PLS 1, la jugosidad está positivamente correlacionada con el parámetro η_N. En el eje PLS 2, la dureza sensorial esta negativamente correlacionada con los parámetros J_0, J_1 y J_2 y positivamente correlacionada con el tiempo de retardo 1 (λ_1).

Analizando la **Figura 4-79** no se observó una tendencia en la ubicación de las muestras de pera en función las los factores PLS 1 y PLS 2. Este comportamiento era esperado dadas las pocas diferencias encontradas en los atributos texturales de las muestras de pera.

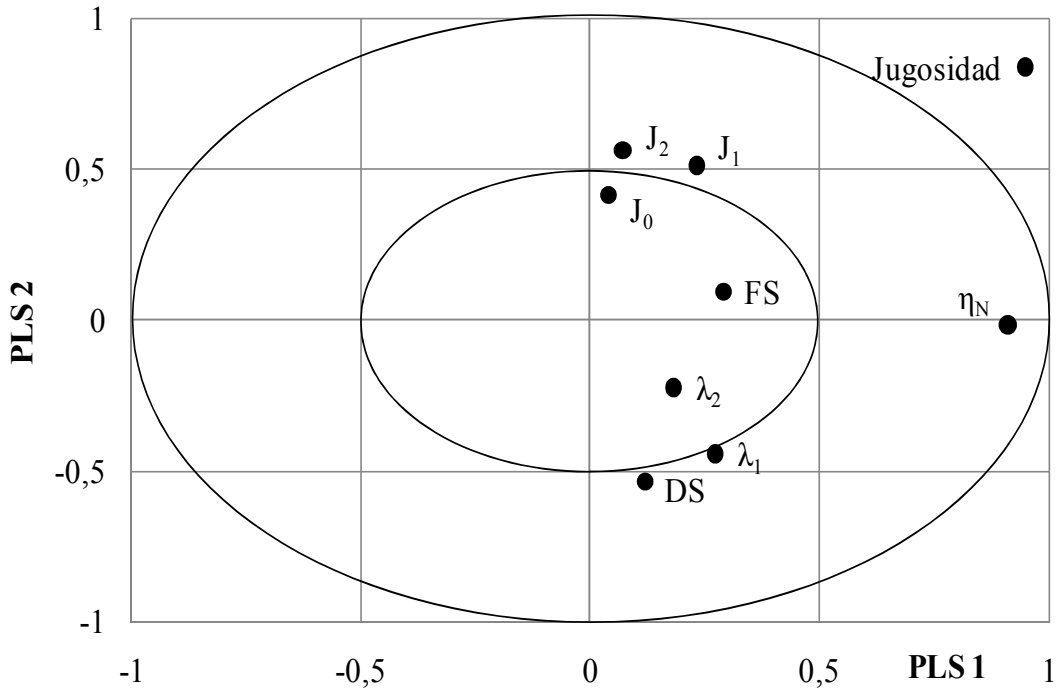


Figura 4-78. Correlación entre las variables de los ensayos de fluencia y los atributos sensoriales de tejido de pera fresco, inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con UV-C e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado con UV-C.

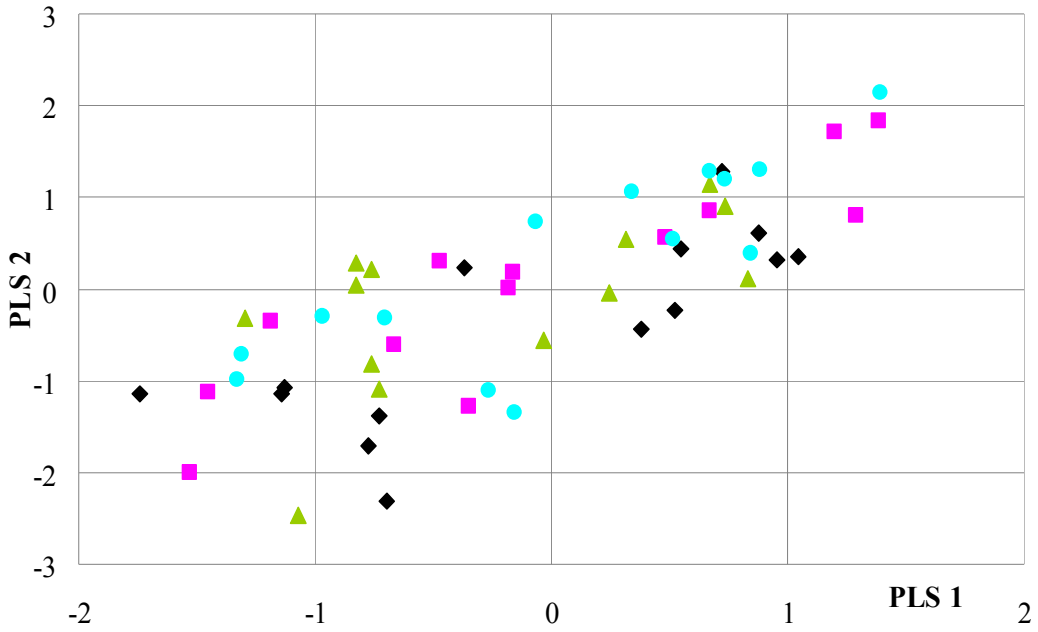


Figura 4-79. Ubicación del tejido de pera fresco y tratado en función de la PLS 1 vs PLS 2. (♦) control (C), (▲) inmerso en solución antipardeamiento (SA), (■) inmerso en solución antipardeamiento e irradiado (SA+UV-C), (●) inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado (SA+P+UV-C).

4.4.1.4. Caracterización microestructural y ultraestructural

Se evaluaron los cambios micro y ultraestructurales del tejido parenquimático de pera fresco, inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado, mediante microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de transmisión (MET). Las observaciones se realizaron sobre la superficie irradiada.

Las microfotografías obtenidas con MO del tejido fresco (**Figuras 4-80-A y B**) mostraron células bien redondeadas con espacios intercelulares formados por la conjunción de 3 ó 4 células. Los espacios intercelulares fueron más pequeños comparados con los de otras frutas, entre ellas manzana ó melón (Alandes y col, 2006; Quiles y col, 2007). Se observó una gran vacuola central ocupando la mayor parte del lumen celular. En general, el citoplasma se mostró pegado a la pared celular formando una delgada capa de alta densidad óptica, pero en algunas células se observó leve plasmólisis. Las observaciones con MET mostraron paredes celulares con buena densidad electrónica, con el material fibrilar densamente empaquetado, en varias zonas con una laminilla media bien marcada (alta densidad) en la zona central (**Figura 4-82-A y B**). El citoplasma se presentó levemente despegado de la pared celular, rodeado por el plasmalema y el tonoplasto, los cuales se observaron intactos.

Las paredes de las células del tejido de pera inmerso en solución antipardeamiento se mostraron menos teñidas. En algunos casos se observó ruptura de membrana y plasmólisis (**Figura 4-80-C y D**). En MET, las paredes en algunas zonas se observaron con menor densidad electrónica sin laminilla media y con clara alteración del patrón fibrilar. También se mostraron levemente onduladas (**Figura 4-82-C y D**). Gómez (2010) reportó que el tejido de manzana tratado con la misma solución antipardeamiento no presentó grandes cambios con respecto al control fresco. No hubo disrupción de membranas y el citoplasma fue parietal. Sólo en algunas células observó ruptura de membranas probablemente debido al efecto del corte.

El tratamiento UV-C provocó ruptura de la membrana celular (disrupción del tonoplasto y plasmalema). Las paredes se observaron teñidas (**Figura 4-81-E y F**) y las células se mostraron sin turgencia. Las paredes celulares aparecieron plegadas con algunas zonas de baja densidad electrónica y sin laminilla media. El citoplasma se observó fragmentado (ruptura de membranas) y separado (plasmólisis) (**Figura 4-83-E y F**). Gómez (2010)

también encontró que la irradiación UV-C causó ruptura de membranas en las células de manzana tratadas previamente con la solución antipardeamiento.

Las paredes de las células del tejido inmerso en SA y P y posteriormente tratado con UV-C se observaron más debilitadas (baja densidad de tinción) y las células aparecieron más redondeadas que las irradiadas con solo inmersión en SA y separadas entre ellas. Se visualizaron fragmentos de la membrana celular por ruptura y colapso celular (**Figura 4-81-G y H**). Como se observa en las microfotografías con TEM (**Figura 4-83-G y H),** las paredes celulares mostraron moderada densidad electrónica, y alteración de la estructura de las microfibrillas y la laminilla media. Se observó presencia de vesículas y el citoplasma apareció con disrupciones y separado de la pared celular.

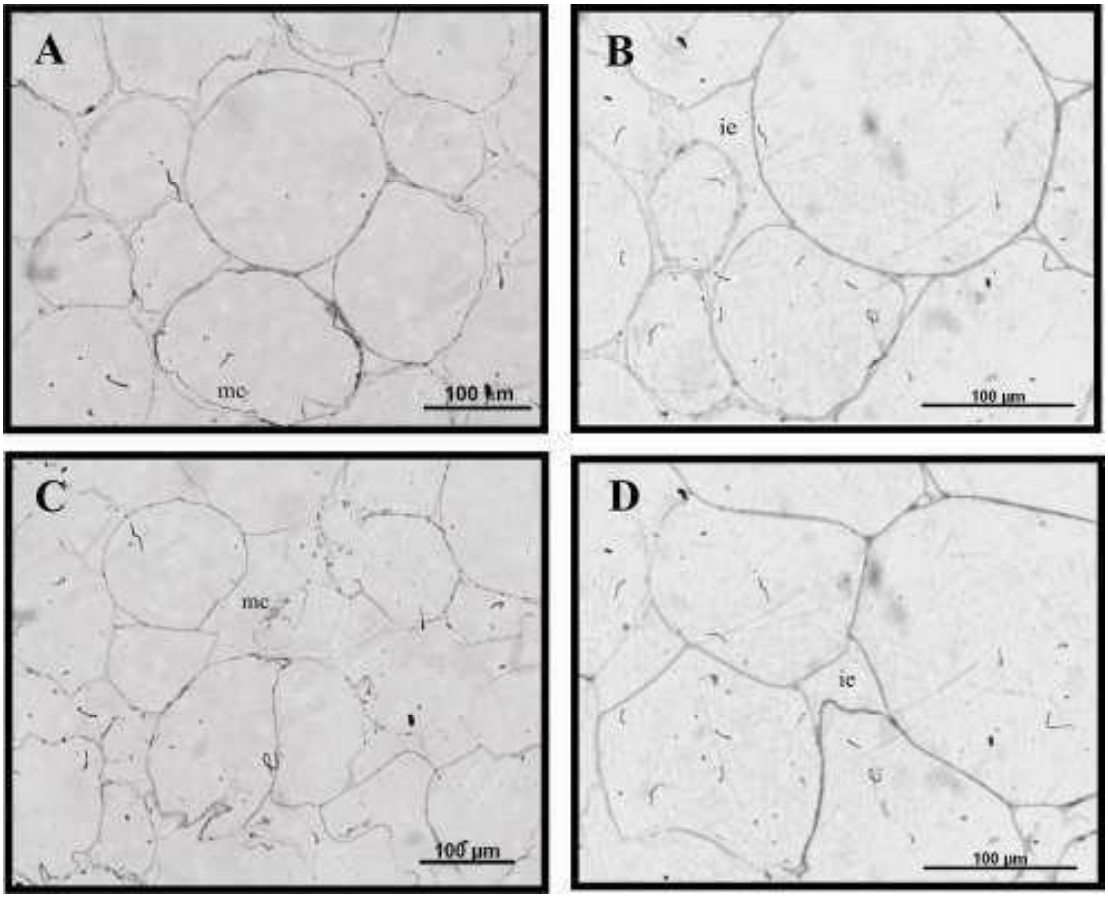


Figura 4-80. Imágenes de microscopia óptica de la superficie del tejido de pera fresco e inmerso en solución antipardeamiento. A, B: fresco (control); C, D: inmerso en SA. ie: espacio intercelular; mc: membrana celular.

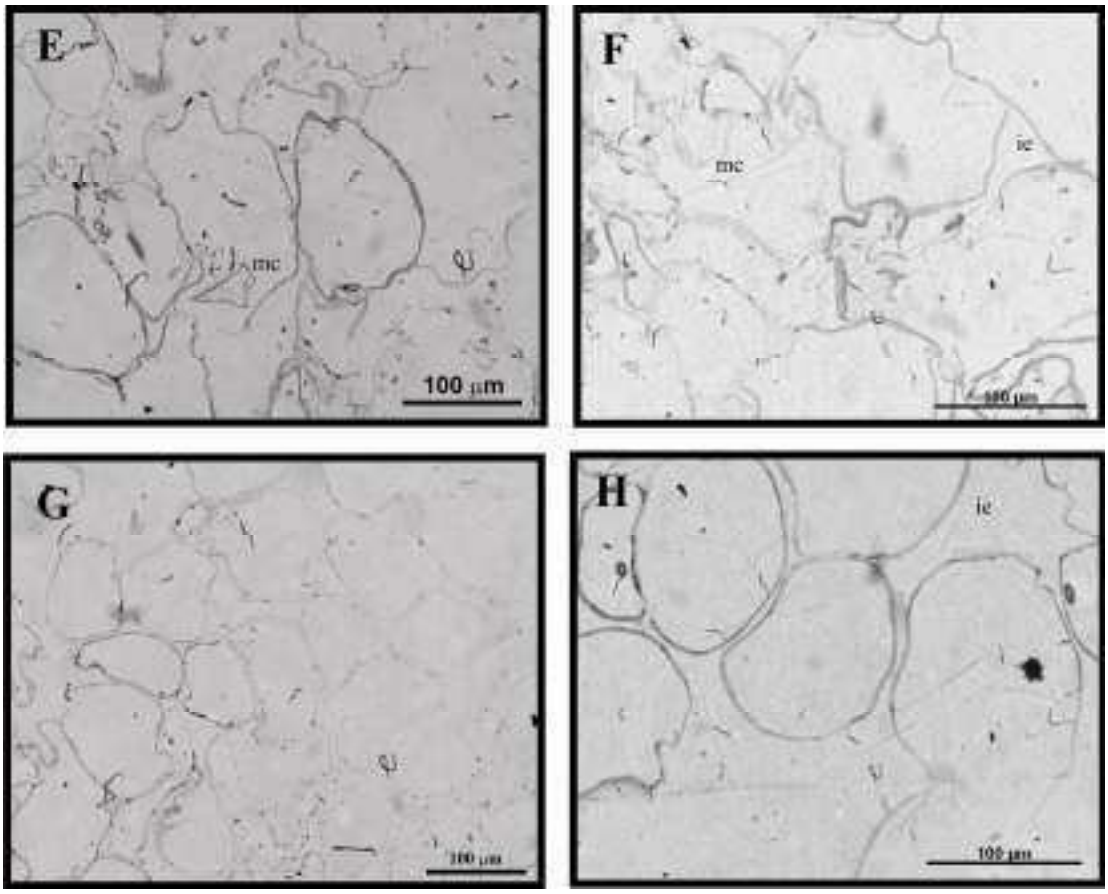


Figura 4-81. Imágenes de microscopia óptica de la superficie del tejido de pera inmerso en solución antipardeamiento e irradiado e inmerso en solución antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado. E, F: SA+UV-C; G, H: SA+P+UV-C. ie: espacio intercelular; mc: membrana celular.

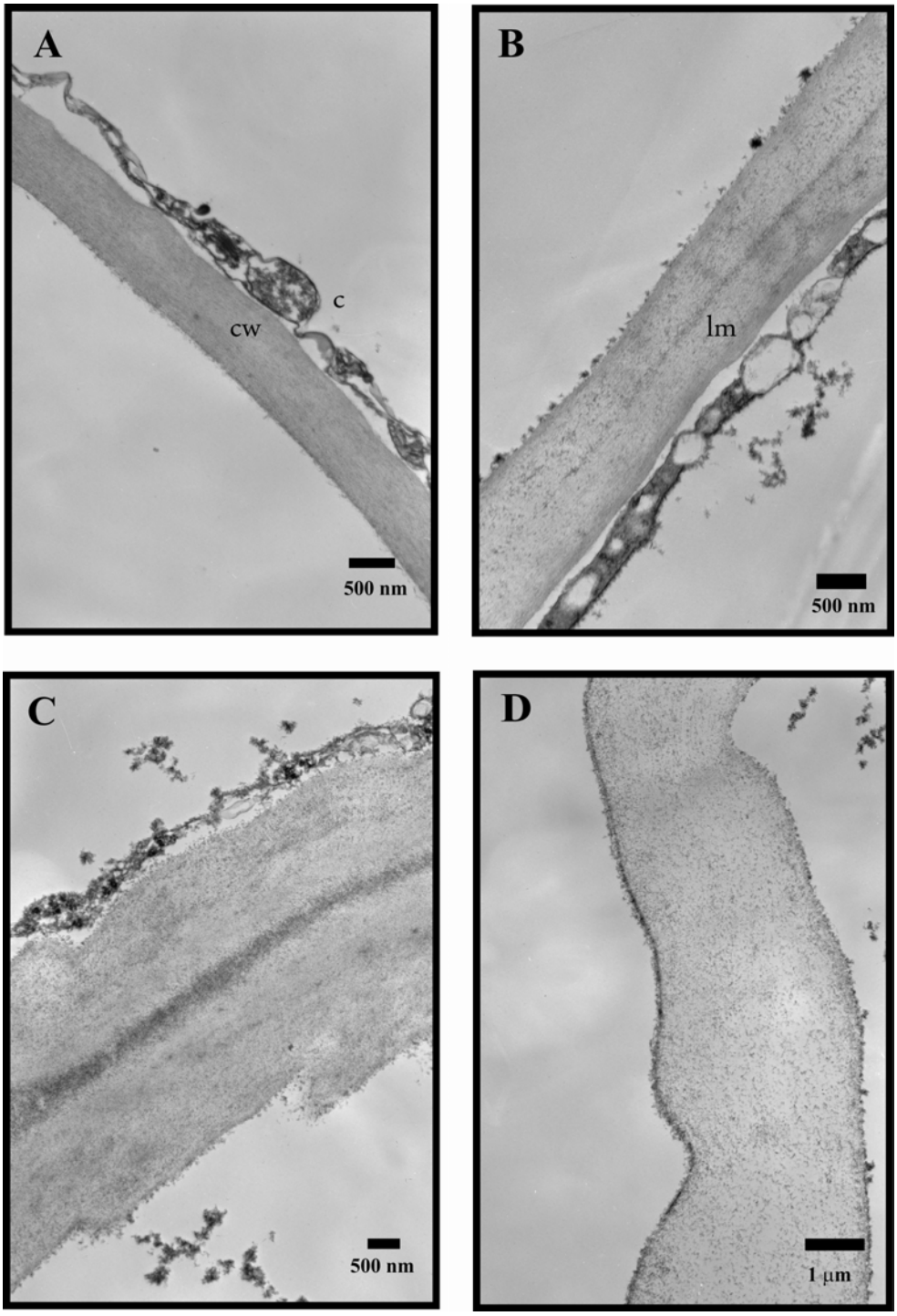


Figura 4-82. Imágenes de microscopia electrónica de transmisión de la superficie del tejido de pera fresco e inmerso en solución antipardeamiento. A, B: fresco (control); C, D: inmerso en SA. cw: pared celular, lm: laminilla media, c: citoplasma.

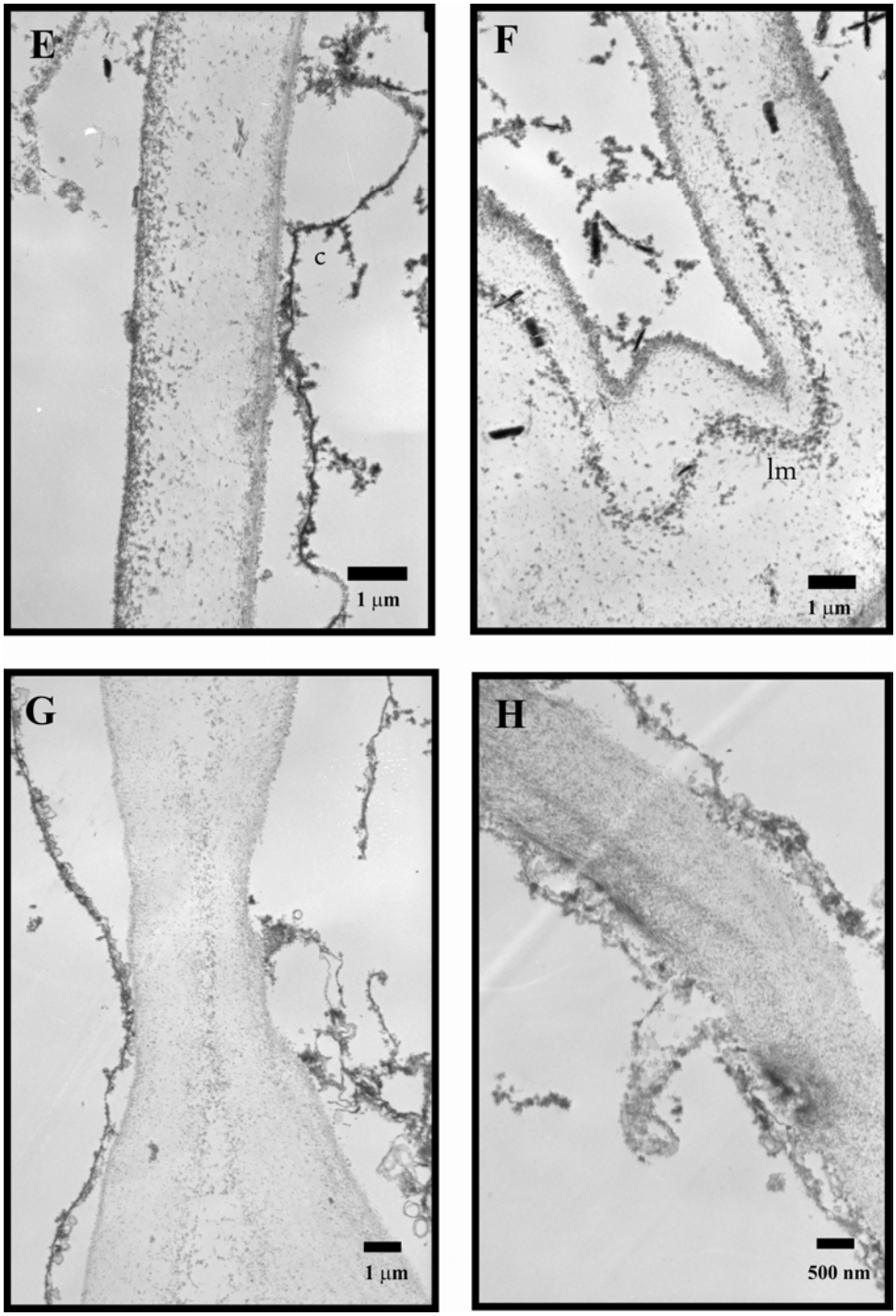


Figura 4-83. Imágenes de microscopia electrónica de transmisión de la superficie del tejido de pera inmerso en solución antipardeamiento e irradiado e inmerso en soluciones antipardeamiento, peróxido de hidrógeno e irradiado. E, F: SA+UV-C; G, H: SA+P+UV-C. cw: pared celular, lm: laminilla media, c: citoplasma.

4.4.1.5. Integración de los resultados obtenidos mediante los ensayos reológicos, la evaluación de la textura y la caracterización micro y ultraestructural.

La aplicación de la luz UV-C en frutas ha sido estudiada con dos objetivos: (1) reducir la carga inicial de microorganismos en la superficie del producto, y (2) inducir una respuesta al estrés.

Los cambios en el tejido de pera tratado con luz UV-C fueron a nivel superficial debido a la escasa penetración de la radiación UV-C. Los ensayos reológicos utilizados para evaluar el tejido fueron capaces de detectar cambios en la estructura del tejido irradiado con luz UV-C (con inmersión en SA, con o sin peróxido de hidrógeno). En cambio, no se detectaron cambios significativos en los atributos sensoriales evaluados (dureza, fracturabilidad y jugosidad) entre las muestras tratadas (C_5, SA, SA+LP) y el control.

Las rodajas de pera inmersas en solución antipardeamiento, inmersas en solución antipardeamiento e irradiadas con UV-C e inmersas en solución antipardeamiento con peróxido de hidrógeno e irradiadas con UV-C mostraron una disminución en los módulos G' y G" en relación al tejido fresco (control). Esta disminución estaría asociada con las alteraciones observadas en la estructura del tejido de pera tales como disrupción de membranas, pérdida de presión de turgor, degradación de la laminilla media y disociación parcial de las paredes celulares. Los tejidos que fueron irradiados y pretratados con peróxido de hidrógeno presentaron importantes disrupciones de membranas y degradación de la pared celular, con la consecuente pérdida de la adhesión entre células, reflejándose ello en módulos menores a los valores obtenidos para el tejido irradiado sólo inmerso en SA.

Los resultados de los ensayos de fluencia-recuperación fueron analizados teniendo en cuenta el modelo estructural propuesto por Alzamora y col. (2008) descripto anteriormente.

Las capacitancias J_0, J_1 y J_2 de las peras tratadas se incrementaron debido a los tratamientos siendo más marcado el aumento en los tejidos tratados con peróxido de hidrógeno. Los cambios en J_0 podrían ser relacionados en parte con la pérdida de turgor y la plasmólisis observada en algunas muestras, como asimismo la alteración de la pared a nivel de la celulosa. En las muestras pretratadas con peróxido estos cambios fueron más abruptos correspondiéndose con mayores aumentos en J_0. Las observaciones en el tejido

de pera tratado realizadas con MET denotan paredes celulares totalmente plegadas y onduladas con poca definición de la laminilla media y degradación de microfibrillas en algunas zonas, lo que justificaría el aumento observado en las capacitancias J_1 , J_2 y $1/\eta_N$, reflejando una mayor fluidez de la pared celular.

Las propiedades mecánicas del tejido de pera a grandes deformaciones fueron afectadas por la radiación UV-C (con pretratamientos). En los tejidos inmersos en solución antipardeamiento se observó una disminución en todos los parámetros que podría relacionarse con la ruptura de membranas, pérdida de turgencia y plasmólisis observados en las micrografías de MO (**Figuras 4-80-C, D**). El módulo de deformabilidad disminuyó considerablemente para los tejidos tratados indicando una pérdida de la rigidez.

En las muestras tratadas con UV-C (SA+UV-C; SA+P+UV-C) las disminuciones en los valores de los parámetros mecánicos fue más marcada con respecto a los valores del control. La luz UV-C provocó ruptura de las membranas celulares (disrupción del tonoplasto y plasmalema) (**Figura 4-81-E, F**). Las paredes celulares aparecieron plegadas (ondulaciones) y degradadas en algunas zonas con el citoplasma fragmentado (ruptura de membranas) y separado (plasmólisis). Las células del tejido inmerso en SA y P y posteriormente tratadas con radiación UV-C presentaron ruptura de membranas y las paredes se observaron levemente teñidas, separadas entre ellas (degradación de laminilla media) y muy debilitadas (**Figura 4-81-G, H**). Las paredes celulares aparecieron con baja densidad electrónica, y se evidenció degradación de la estructura de las microfibrillas y la laminilla media por efecto del pretratamiento con peróxido de hidrógeno (o su combinación con la irradiación UV-C posterior). El citoplasma se observó degradado y separado de la pared celular.

La evaluación de textura oral no presentó cambios significativos entre los tejidos tratados con respecto al control en la dureza, fracturabilidad y jugosidad. Como la irradiación con luz UV-C es un tratamiento que tiene baja penetración en el tejido, los cambios observados se manifestaron a nivel superficial. Como los análisis de textura (100% de compresión) se analizan a grandes deformaciones, estas diferencias no pudieron ser totalmente apreciadas. Sin embargo, los ensayos instrumentales (bajas y altas deformaciones) encontraron diferencias significativas entre las muestras tratadas y control indicando que estos últimos fueron más sensibles para detectar pequeñas diferencias.

El análisis de regresión lineal de cuadrados mínimos parciales (PLS) encontró algunas correlaciones entre los parámetros reológicos (de fluencia y mecánicos) y los

atributos texturales. Es importante destacar que los atributos texturales en todos los tratamientos de pera evaluados fueron mejor explicados por los parámetros de fluencia.

En general la dureza sensorial fue negativamente correlacionada con las capacitancias J_0, J_1 y J_2; y positivamente correlacionada con el módulo de deformabilidad. A su vez el módulo de deformabilidad estaba correlacionado con la fracturabilidad sensorial. La jugosidad fue asociada positivamente con el parámetro η_N y negativamente con el módulo de deformabilidad (parámetro de rigidez). Estas correlaciones fueron consistentes con los cambios observados a nivel celular superficial, es decir la pérdida de la presión de turgor (menor módulo de deformabilidad y G'; y aumento de J_0); y alteración y degradación de la pared celular y laminilla media aumentando la fluidez de la matriz celular (mayor jugosidad, menor módulo de deformabilidad, aumento de J_1, J_2 y $1/\eta_N$).

4.4.2. Aplicación de luz ultravioleta de onda corta en tejido de manzana

El tejido de manzana fue previamente tratado con solución antipardeamiento (1 % p/v de cloruro de calcio/ 1% p/v de acido ascórbico), luego se irradió con luz ultravioleta de onda corta (UV-C) y posteriormente se almacenó durante 5 días de acuerdo a lo descripto en **Materiales y Métodos sección 3.3.2.1.2**. En esta sección se evaluaron solamente las propiedades reológicas a grandes deformaciones (ensayo de doble compresión) y la textura del tejido de manzana para completar e integrar los resultados de investigaciones anteriores del grupo de trabajo. Gómez (2010) ya había evaluado en su tesis doctoral las propiedades reológicas a bajas deformaciones (barrido de frecuencia y ensayos de fluencia y recuperación) y los cambios a nivel micro y ultraestructural. En dicha tesis se encontró que las muestras tratadas no mostraron cambios en las propiedades reológicas del tejido irradiado, con o sin pretratamiento antipardeamiento al día 0 pero sí detectaron cambios después de algunos días de almacenamiento. De acuerdo a ello, los ensayos se realizaron en las manzanas almacenadas en refrigeración durante 5 días. Los ensayos no se evaluaron en muestras almacenadas siete días debido a que el control almacenado después del quinto día presentaba un pardeamiento que podría influir en las evaluaciones sensoriales.

Se evaluaron las siguientes muestras: el tejido fresco o control (C), el tejido control almacenado bajo refrigeración durante 5 días (C_5), el tejido tratado con solución antipardeamiento (SA) y almacenado bajo refrigeración durante 5 días, el tejido irradiado con luz ultravioleta (UV-C) y almacenado bajo refrigeración durante 5 días, y el tejido tratado con solución antipardeamiento y radiación ultravioleta (SA+UV-C) y almacenado en refrigeración durante 5 días.

4.4.2.1. Propiedades reólogicas

- **Ensayos de doble compresión**

Las curvas experimentales obtenidas en los ensayos de doble compresión para las muestras tratadas y control se observan en la **Figura 4-84**. A partir de las mismas se calcularon los parámetros mecánicos correspondientes a las distintas muestras (**Tabla 4-55**). Se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos y el control ($F_{40,376}$ = 10,8; $p<0,0001$). Además, todos los tratamientos difirieron significativamente entre ellos.

El patrón de la curva de la manzana fresca fue similar al descripto para el control en las experiencias anteriores. Todas las muestras exhibieron un pico inicial correspondiente a la fracturabilidad.

En los tejidos control almacenados (C_5), los inmersos en la solución antipardeamiento (SA) y en los irradiados con luz UV-C (UV-C) se observó un aumento en la dureza, la fracturabilidad y el área bajo la curva de la primera compresión, comparados con el tejido control (C). El módulo de deformabilidad también aumentó en las muestras C_5, UV-C y SA+UV-C indicando un incremento en la rigidez.

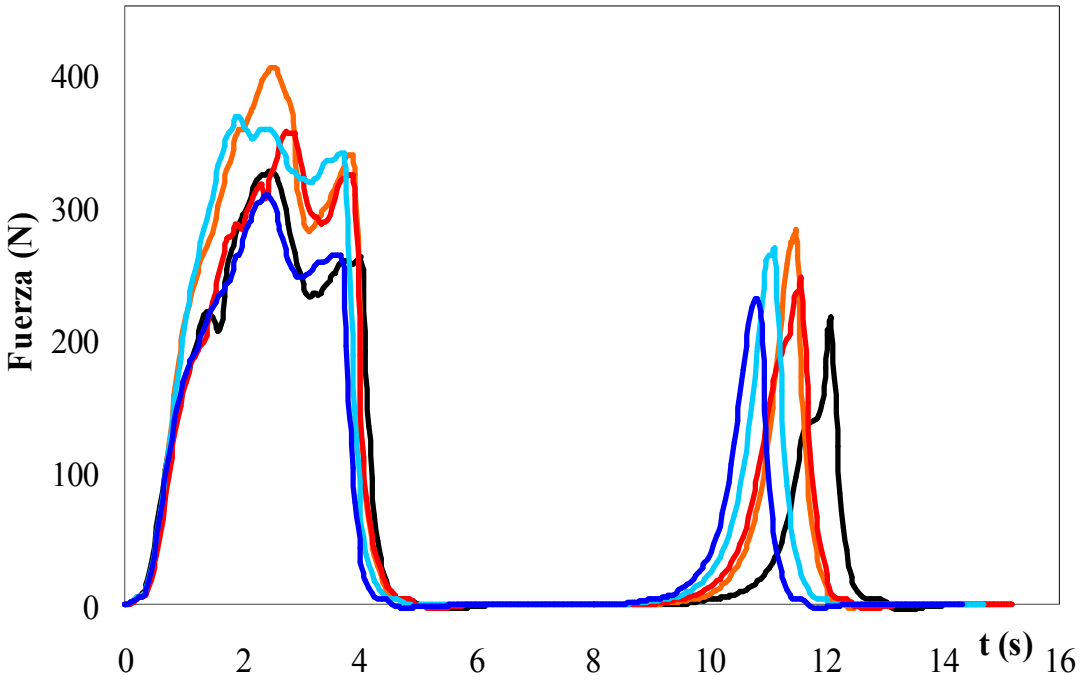


Figura 4-84. Curvas típicas de doble compresión de tejido de manzana fresco, e inmerso en solución antipardeamiento, irradiado 20 min, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado 20 min y control, almacenados en refrigeración a 4-5ºC. (—) control, (—) control al día 5, (—) SA al día 5, (—) UV-C al día 5, (—) SA+UV-C al día 5.

El tejido inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con luz UV-C (SA+UV-C) presentó leves cambios significativos con respecto al control; sus parámetros mecánicos fueron muy similares entre sí. Estos resultados son coincidentes con los reportados por Gómez y col. (2010), quienes examinaron el efecto de diferentes dosis de radiación UV-C en la estructura, color superficial y propiedades de compresión de cilindros de manzana almacenados bajo refrigeración durante 7 días. También estudiaron diferentes pretratamientos (escaldado en agua y solución antipardeamiento) para minimizar el pardeamiento superficial causado por la radiación UV-C. Reportaron que los

parámetros de color y de compresión fueron dependientes de la dosis de UV-C, del tiempo de almacenamiento y del tipo de tratamiento. Las propiedades de compresión (esfuerzo real y módulo de deformabilidad) al día 0 no mostraron efectos significativos para las distintas dosis de UV-C evaluadas, pero al día 7 las muestras tratadas presentaron una disminución significativa de los parámetros con respecto al control. También observaron el mismo comportamiento en las muestras pretratadas con la solución antipardeamiento. Es importante tener en cuenta al notar las diferencias con los presentes resultados que ellos utilizaron cilindros de 6 mm de espesor, una velocidad de compresión de 10 mm/minuto y una compresión del 80%.

En la **Figura 4-85** se observa el gráfico obtenido del análisis de componentes principales para las dos primeras componentes. La CP 1 explicó el 61,5 % de la variabilidad y esta última fue atribuida a los cambios en la fracturabilidad, el módulo de deformabilidad, la cohesividad, la masticabilidad, la dureza en la segunda compresión, el área bajo la curva en la primera compresión, y el área bajo la curva en la segunda compresión (**Tabla 4-56, 57 y 58**). La CP 2 representó el 26% de la variabilidad entre las muestras y fue explicada por la dureza en la primera compresión. Mediante la CP 1 se pueden identificar dos grupos con propiedades similares: en el cuadrante positivo, las muestras SA, C y SA+UV-C y en el cuadrante negativo C_5 y UV-C. En general, las muestras no presentaron una propiedad predominante.

Tabla 4-55. Parámetros promedio y su correspondiente desviación estándar de las curvas de doble compresión de tejido de manzana fresco (C), e inmerso en solución antipardeamiento (SA), irradiado 20 min (UV-C), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado 20 min (SA+UV-C) y control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC.

Tratamiento	Fracturabilidad (N)	Dureza (N)	Dureza 2 (N)	Área 1 (J)	Área 2 (J)	Elasticidad (-)	Cohesividad (-)	Gomosidad (N)	Masticabilidad (N)	E_d (N/mm^2)	
C	335,42 ± 22,53	341,21 ± 22,59	236,32 ± 23,94	0,81 ± 0,11	0,13 ± 0,01	0,67 ± 0,03	0,16 ± 0,02	55,02 ± 6,97	36,89 ± 5,57	1,53 ± 0,25	a
C_5	359,6 ± 30,48	389,75 ± 3,.45	273,84 ± 29,94	0,97 ± 0,11	0,11 ± 0,01	0,60 ± 0,05	0,12 ± 0,01	45,69 ± 4,89	27,24 ± 4,28	1,92 ± 0,25	b
SA	345,21 ± 48,36	383,02 ± 44,96	261,92 ± 37,2	0,94 ± 0,1	0,15 ± 0,01	0,64 ± 0,04	0,15 ± 0,01	61,05 ± 7,57	39,44 ± 6,63	1,4 ± 0,21	c
UV-C	358,29 ± 33,54	364,35 ± 34,46	260,9 ± 26,96	0,94 ± 0,1	0,11 ± 0,01	0,66 ± 0,02	0,11 ± 0,01	39,59 ± 5,07	26,23 ± 3,73	1,77 ± 0,34	d
SA+UV-C	335,95 ± 45,08	339,89 ± 46,68	253,8 ± 30,04	0,88 ± 0,13	0,12 ± 0,02	0,61 ± 0,02	0,14 ± 0,01	46,62 ± 6,5	28,5 ± 4,28	1,75 ± 0,26	e

Valores de una misma fila con igual letra no presentan diferencias significativas con un 95 % de nivel de confianza.

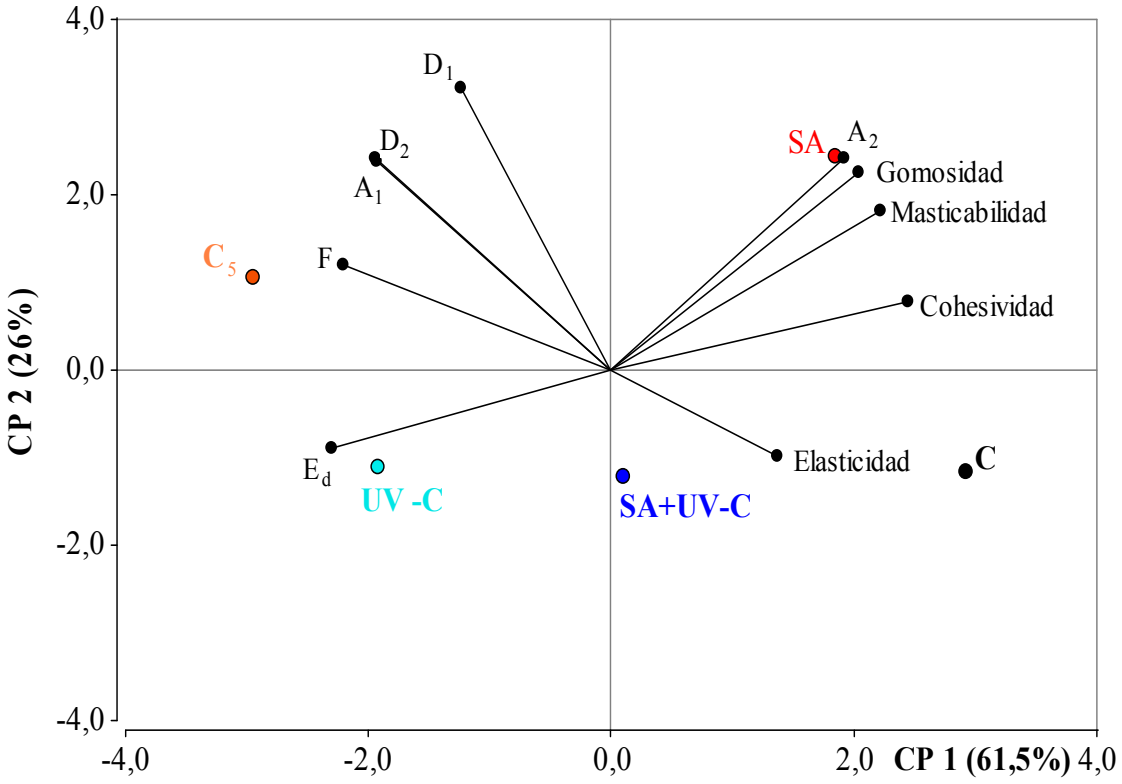


Figura 4-85. Análisis de componentes principales para los parámetros de las curvas de doble compresión en tejido de manzana. (●) fresco (C), e (●) inmerso en solución antipardeamiento (SA), (●) irradiado con UV-C (UV-C), (●) inmerso en solución antipardeamiento e irradiados con UV-C (SA+UV-C) y (●) control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC.

Tabla 4-56, 4-57 y 4-58. Autovalores, autovectores y correlaciones correspondientes al PCA de los parámetros mecánicos de tejido de manzana fresco, e inmerso en solución antipardeamiento (SA), irradiado con UV-C, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con UV-C (SA+UV-C) y control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC.

Autovalores			
PC	Valor	Proporción	Prop.Acum.
1	6,15	0,61	0,61
2	2,6	0,26	0,87

Autovectores		
Variables	CP 1	CP 2
Fracturabilidad (F)	-0,34	0,16
Dureza (D_1)	-0,19	0,53
Dureza 2 (D_2)	-0,31	0,39
Area 1 (A_1)	-0,3	0,4
Area (A_2)	0,32	0,37
Elasticidad	0,2	-0,16
Cohesividad	0,39	0,1
Gomosidad	0,34	0,34
E_d	-0,36	-0,18
Masticabilidad	0,36	0,26

Correlaciones con las variables originales		
Variables	CP 1	CP 2
Fracturabilidad (F)	-0,85	0,27
Dureza (D_1)	-0,48	0,85
Dureza 2 (D_2)	-0,76	0,63
Area 1 (A_1)	-0,75	0,64
Area (A_2)	0,79	0,59
Elasticidad	0,48	-0,26
Cohesividad	0,97	0,16
Gomosidad	0,83	0,54
E_d	-0,88	-0,29
Masticabilidad	0,89	0,42

Valor en rojo representa la variable(s) más relevante(s) de la componente principal.

4.4.2.2. Análisis sensorial

La textura oral de las muestras frescas, refrigeradas durante 5 días, inmersas en solución antipardeamiento e inmersas en solución antipardeamiento e irradiadas con UV-C fue evaluada con un panel entrenado a través de los parámetros dureza, fracturabilidad, crujencia y jugosidad tal como se describe en **Materiales y Métodos sección 3.7.1.3.** La cohesividad no se tuvo en cuenta porque los cambios producidos en el tejido fueron a nivel superficial y dicha propiedad no se presentaba modificada según lo informó el panel en sesiones previas. En la **Tabla 4-59** se detallan los resultados de las evaluaciones sensoriales.

Tabla 4-59. Parámetros texturales promedio y su correspondiente desviación estándar del análisis sensorial de tejido de manzana fresco (C), e inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con UV-C (SA+UV-C) y control (C_5), almacenadas en refrigeración a 4-5ºC.

Tratamiento	Dureza	Fracturabilidad	Crujencia	Jugosidad
C	$6,06 \pm 0,58^{a}$	$6,75 \pm 0,79^{a}$	$7,47 \pm 0,49^{a}$	$5,68 \pm 0,41^{a}$
C_5	$6,47 \pm 0,52^{a}$	$8,21 \pm 1,33^{b}$	$7,4 \pm 1,4^{a}$	$4,81 \pm 1,01^{b}$
SA	$6,22 \pm 0,44^{a}$	$7,29 \pm 0,73^{a}$	$7,13 \pm 1,26^{a}$	$5,53 \pm 0,31^{a}$
SA+UV-C	$6,4 \pm 0,35^{a}$	$7,03 \pm 0,55^{a}$	$7,23 \pm 0,86^{a}$	$5,27 \pm 0,56^{ab}$

Medias de una misma columna con igual letra no presentan diferencias significativas con un 95 % de nivel de confianza.

En general no se observaron cambios muy relevantes en las propiedades texturales. Si bien los evaluadores detectaron un leve aumento en la dureza de los tejidos de manzana

almacenados, las diferencias no fueron significativas ($F_{3,12}$ = 2,21; p = 0,11). Los juicios emitidos por el panel fueron consistentes y homogéneos ($F_{4,12}$ = 2,8; p = 0,53).

La fracturabilidad sensorial presentó diferencias significativas ($F_{3,9}$ = 7,96; p=0,001) entre el control fresco y la muestra control refrigerada durante 5 días. No se encontraron diferencias significativas entre el control fresco y la muestra inmersa en solución antipardeamiento y entre el control fresco y la muestra inmersa en solución antipardeamiento e irradiada con UV-C. Los juicios emitidos fueron homogéneos ($F_{3,15}$ = 0,28; p = 0,83).

La crujencia de los tejidos tratados y del tejido control almacenado no presentó diferencias significativas con respecto a la del tejido fresco. Sin embargo los evaluadores percibieron una disminución (no significativa) en las muestras tratadas. No se encontraron diferencias significativas entre los juicios emitidos por los evaluadores ($F_{5,15}$ = 2,1; p = 0,1).

La jugosidad en la manzana control almacenada disminuyó significativamente ($F_{3,24}$ = 5,6; p = 0,006) con respecto a la del control. No se encontraron diferencias significativas entre la jugosidad del tejido fresco y la del tejido inmerso en SA, y entre el control y la muestra inmersa en SA e irradiada. El factor evaluadores del análisis de varianza no presentó diferencias significativas ($F_{4,12}$ = 2,2; p = 0,11).

En la **Figura 4-86** se observa el perfil textural sensorial obtenido para la muestras control, C_5, SA y SA+UV-C, indicando que los tratamientos evaluados provocaron una disminución en la jugosidad. Es de notar la menor jugosidad y la mayor fracturabilidad de la manzana control después del almacenamiento refrigerado.

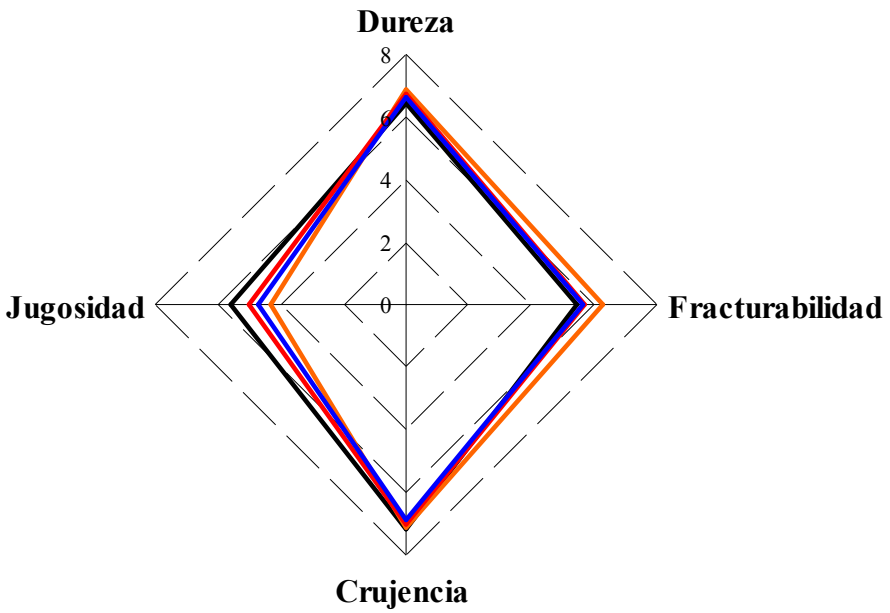


Figura 4-86. Perfil de Textura de tejido de manzana fresco (C), e inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con UV-C (SA+UV-C) y control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC. (▬) control, (▬) control al día 5, (▬) SA al día 5, (▬) SA+UV-C al día 5.

4.4.2.3. Correlación entre las propiedades reológicas y la textura utilizando regresión lineal de cuadrados mínimos parciales

Para correlacionar los atributos texturales con las propiedades reológicas se utilizó el análisis de regresión lineal por cuadrados mínimos parciales. Se correlacionaron los resultados de textura con los resultados de las propiedades mecánicas y con los resultados de los parámetros de las curvas de fluencia. Estos últimos parámetros fueron extraídos de la tesis de Doctorado de Gómez (2010). En la **Figura 4-87** se observan las curvas experimentales promedio de deformación vs tiempo para las muestras tratadas y control.

Los parámetros obtenidos del modelo de Kelvin Voigt generalizado con dos elementos (J_0, J_1, J_2, λ_1, λ_2 y η_N) se muestran en la **Tabla 4-60.**

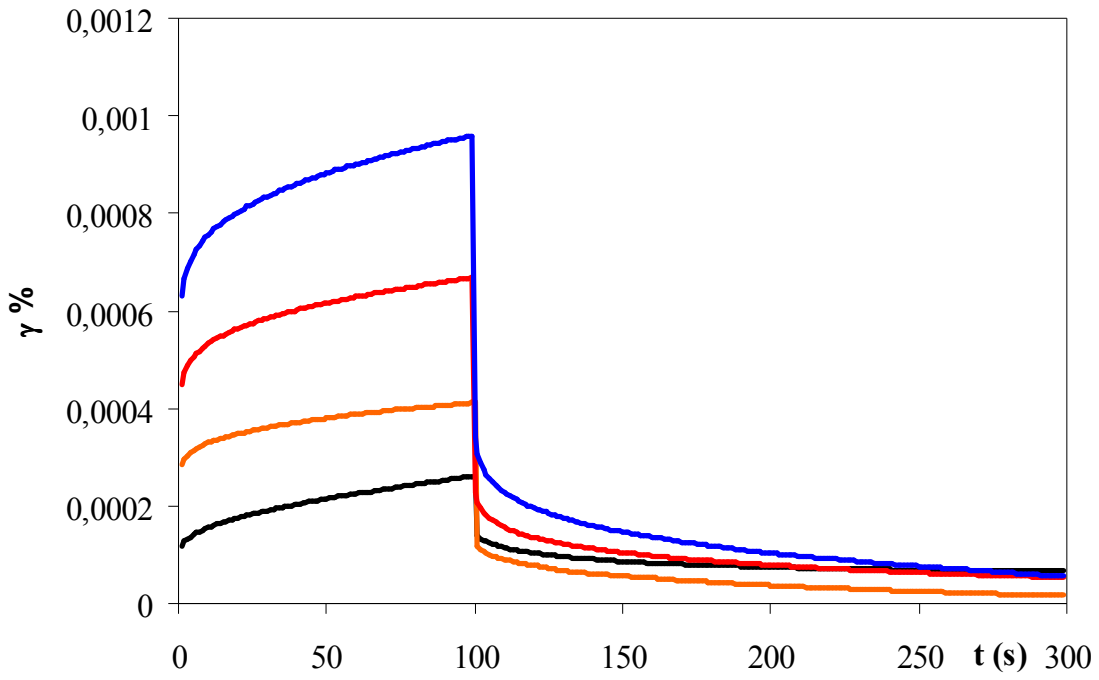


Figura 4-87. Curvas promedio de fluencia – recuperación de tejido de manzana fresco (C), e inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con UV-C (SA+UV-C) y control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC. (▬) control, (▬) control al día 7, (▬) SA al día 7, (▬) SA+UV-C al día 7. Fuente: Gómez (2010).

Gómez (2010) concluyó en relación a las rodajas de manzana tratadas almacenadas 7 días que:

- Los valores de J_0 y J_2 aumentaron en todas las muestras, siendo levemente mayores en las rodajas con el tratamiento de ácido ascórbico/cloruro de calcio que fueron o no expuestas a la radiación UV-C.
- La capacitancia J_1 se incrementó levemente sólo en las rodajas irradiadas. Por lo tanto, los tratamientos a los que fueron sometidas las muestras indujeron una leve pérdida de elasticidad y rigidez del tejido al cabo del almacenamiento.
- Los tiempos de retardo (λ_1 y λ_2) no presentaron diferencias entre las muestras.
- El coeficiente de viscosidad en el estado estacionario disminuyó durante el almacenamiento, presentando valores levemente inferiores al del control.
- Al final del almacenamiento, el incremento de la capacitancia total al final de la fase de fluencia de las muestras tratadas comparadas con el tejido fresco fue de

aproximadamente 120% en las rodajas tratadas con solución antipardeamiento sin irradiar, y de 200% en las muestras irradiadas.

- Las propiedades viscoelásticas de las rodajas de manzana irradiadas no se vieron afectadas notoriamente por efecto de la aplicación previa de la solución antipardeamiento de ácido ascórbico/cloruro de calcio (las curvas y parámetros correspondientes no se muestran)

Tabla 4-60. Parámetros promedio y su correspondiente desviación estándar de las curvas de fluencia* de tejido de manzana fresco (C), e inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con UV-C (SA+UV-C) y control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC durante 7 días.

Tratamiento	J_0 (1/Pa) (x 10^6)	J_1 (1/Pa) (x 10^6)	J_2 (1/Pa) (x 10^6)	λ_1 (s)	λ_2 (s)	η_N (Pa.s) (x 10^{-8})
C	3,4 ±1,2 40%**	1,8 ± 1,2 21%**	0,9 ± 0,4 11%	27,1 ± 6,1	3,0 ± 1,1	0,4 ± 0,3 28%
C_7	7,5 ± 2,1 64%**	1,7 ± 0,5 14%**	1,2 ± 0,5 11%**	22,8 ± 6,5	1,9 ± 0,8	0,8 ± 0,5 11%**
SA	11,8 ± 4,4 63%**	2,6 ± 0,8 14%**	2,1 ± 0,6 11%**	21,2 ± 2,8	2,2 ± 0,2	0,4 ± 0,2 12%**
SA + UV-C	15,6 ± 4,9 61%**	3,7 ± 0,5 14%**	2,9 ± 0,4 11%**	21,9 ± 2,8	2,3 ± 0,4	0,30± 0,06 13%**

* Parámetros obtenidos a partir de la ecuación 3-5.
** Contribución relativa de cada tipo de capacitancia a la capacitancia total al final de la etapa de fluencia. Fuente: Gómez (2010).

4.4.2.3.1. Propiedades mecánicas (TPA)

Se utilizaron los atributos texturales dureza (DS), fracturabilidad (FS), jugosidad y crujencia como variables Y o dependientes, y las parámetros obtenidos del TPA (dureza, fracturabilidad, dureza 2, área 1, área 2, cohesividad, elasticidad, gomosidad, masticabilidad y modulo de deformabilidad) como variables X o independientes.

El modelo de regresión de cuadrados mínimos parciales con cinco factores logró explicar el 71,7 % de la variabilidad de los atributos texturales a través de los parámetros instrumentales. El factor PLS 1 logró explicar el 20 %, el factor PLS 2 el 6,95 %, el factor PLS 3 el 18,5%, el factor PLS 4 el 18% y el factor PLS 5 el 8,3%.

Analizando el modelo propuesto, los atributos mejores explicados considerando los cinco factores fueron jugosidad y crujencia (29,2 y 10,6 % de la varianza explicada respectivamente) mientras que la dureza y fracturabilidad (3,9 % y 7,9 % de la varianza explicada respectivamente) fueron menos explicados (**Figura 4-88**). Los bajos porcentajes observados se explican a través de las pocas diferencias encontradas entre las muestras en los atributos texturales.

Las correlaciones entre las variables sensoriales e instrumentales se muestran en la **Figura 4-89**. Analizando la ubicación de las variables, se observa que la dureza sensorial (DS) está positivamente relacionada con las parámetros dureza (D_1), área 1 (A_1) y módulo de deformabilidad (E_d) y negativamente relacionado con la elasticidad, y que la crujencia esta positivamente relacionado con la fracturabilidad (F) y área 2 (A_2).

Analizando la **Figura 4-90,** no se observó una tendencia en la ubicación de las muestras de manzana en función las los factores PLS 1 y PLS 2. Este comportamiento era esperado debido a las escasas diferencias encontradas en los atributos texturales de las muestras de manzanas fresca e irradiadas.

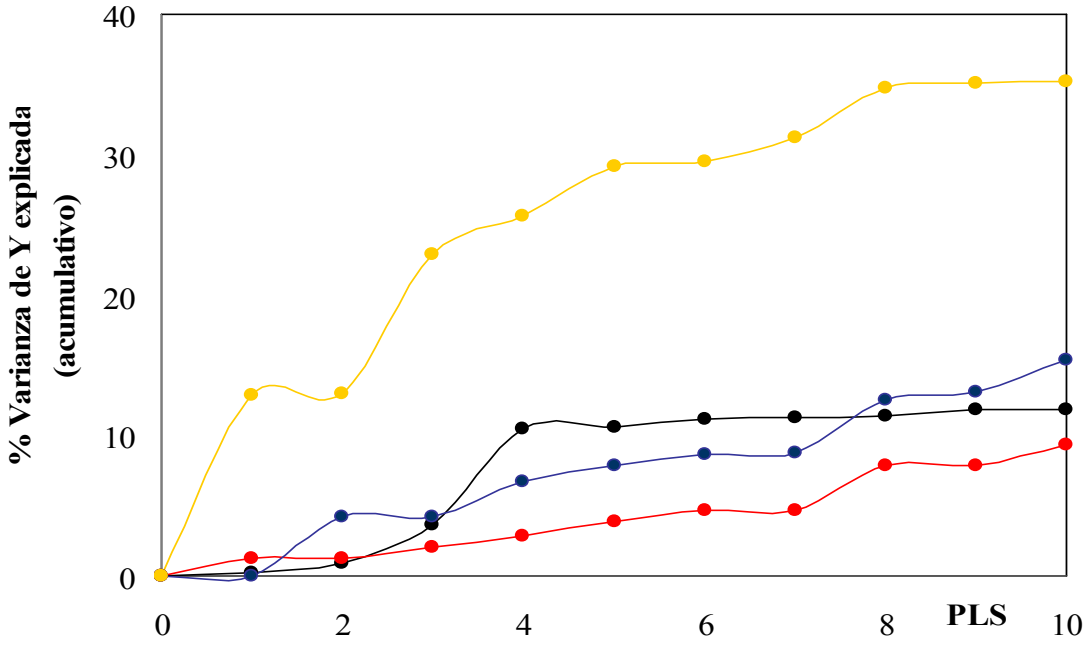


Figura 4-88. Porcentaje de varianza de los atributos sensoriales explicada por los parámetros mecánicos de tejido de manzana fresco, e inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con UV-C, y control, almacenados en refrigeración a 4-5ºC. (—) crujencia, (—) dureza, (—) jugosidad, (—) fracturabilidad.

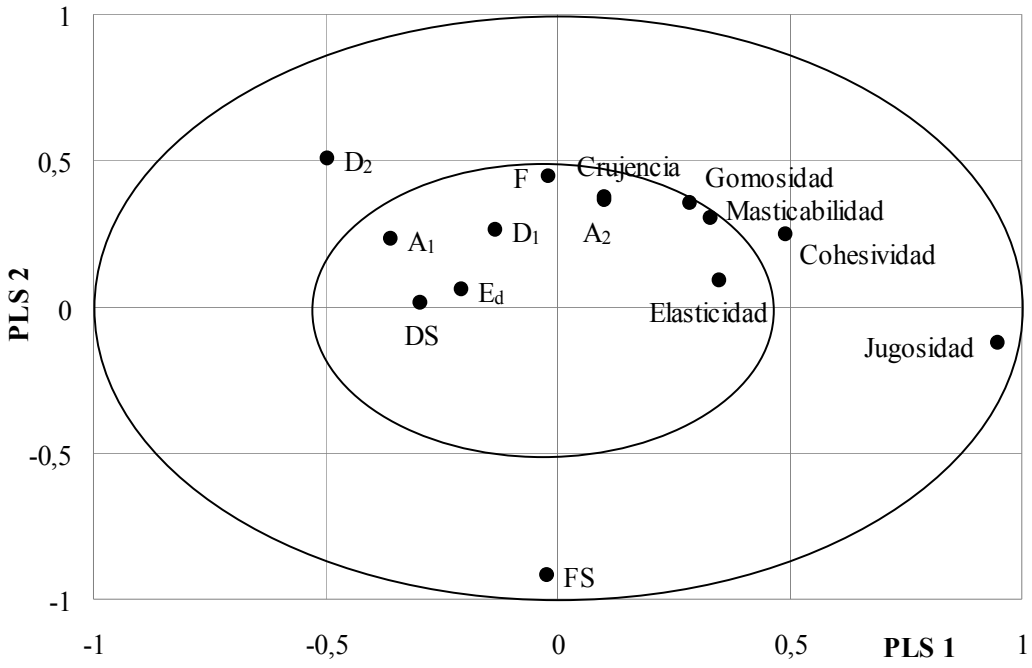


Figura 4-89. Correlación entre las variables del TPA y los atributos sensoriales de tejido de manzana fresco, e inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con UV-C, y control, almacenados en refrigeración a 4-5ºC.

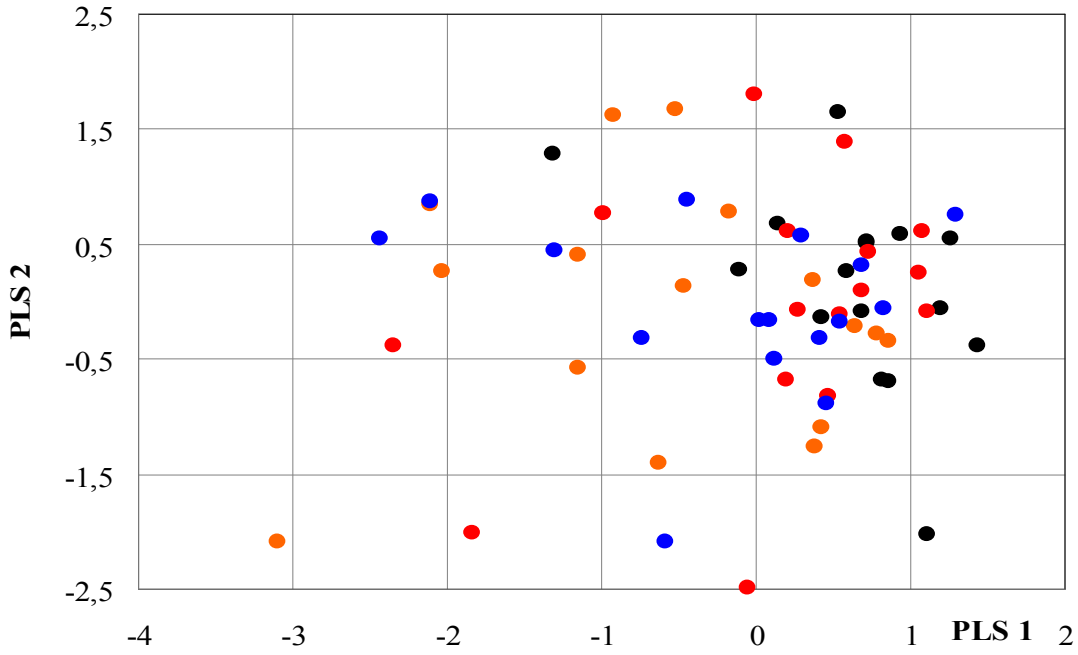


Figura 4-90. Ubicación del tejido de manzana fresco y tratado en función de la PLS 1 vs PLS 2. (●) fresco, e (●) inmerso en solución antipardeamiento (SA), (●) inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con UV-C (SA+UV-C) y (●) control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC.

4.4.2.3.2. Parámetros de fluencia

Se analizó la correlación entre los parámetros de las curvas de fluencia (variables independientes) y los atributos texturales (variables dependientes). El modelo de regresión lineal de cuadrados mínimos parciales con cuatro factores logró explicar el 88,7% de la variabilidad de los atributos texturales a través de los parámetros de las curvas de fluencia. El factor PLS 1 explicó el 37%, el factor PLS 2 el 19,6%, el factor PLS 3 el 8,6% y el factor PLS 4 el 23,5 %. Como la inclusión de nuevos factores al modelo no mejoraba la predicción no fueron considerados en el mismo.

Con el modelo propuesto por cuatro factores los atributos dureza y jugosidad (19,4 y 13,8 % de la varianza explicada respectivamente) fueron los mejores explicados mientras que fracturabilidad sensorial y crujencia fueron poco explicadas (11,2 y 9,4 % de varianza explicada respectivamente) (**Figura 4-91**).

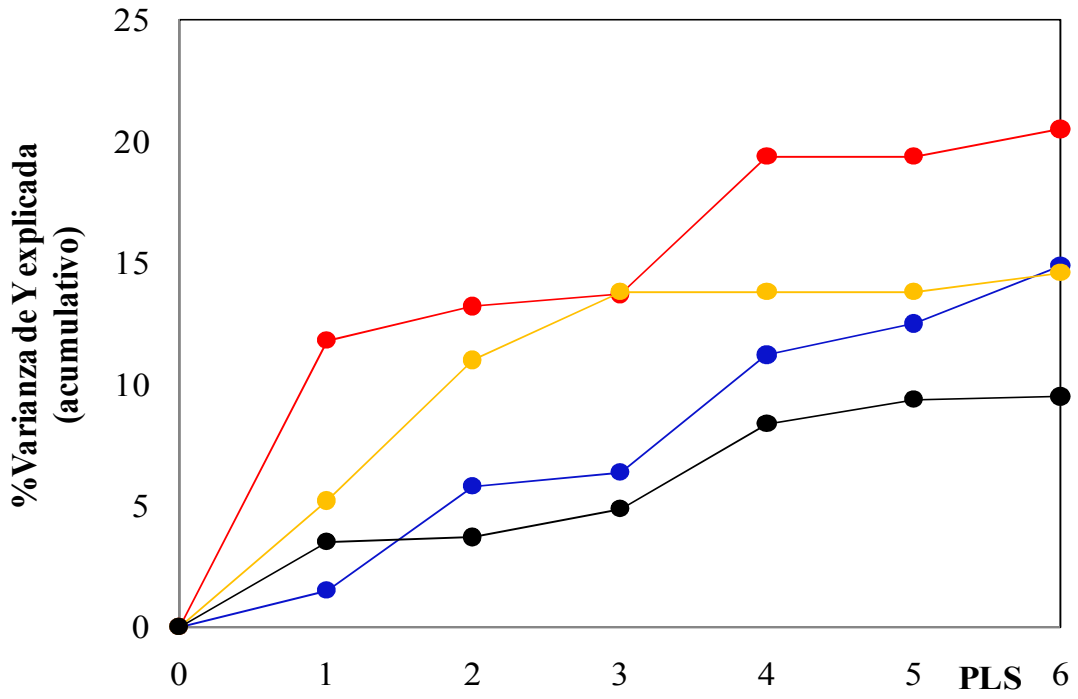


Figura 4-91. Porcentaje de varianza de los atributos sensoriales explicada por los parámetros de fluencia de tejido de manzana fresco, inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con UV-C, y control, almacenadas en refrigeración a 4-5ºC. (—) crujencia, (—) dureza, (—) jugosidad, (—) fracturabilidad.

Las correlaciones entre las variables sensoriales e instrumentales se observan en la **Figura 4-92**. Analizando la ubicación de las variables a través del eje PLS 1, los parámetros J_0, J_1, J_2 y η_N están negativamente correlacionados con la crujencia y la fracturabilidad sensorial.

Analizando la **Figura 4-93,** no se observó una tendencia en la ubicación de las muestras de manzana en función de los factores PLS 1 y PLS 2. Este comportamiento era esperado dadas a las pocas diferencias encontradas en los atributos texturales de las muestras de manzana.

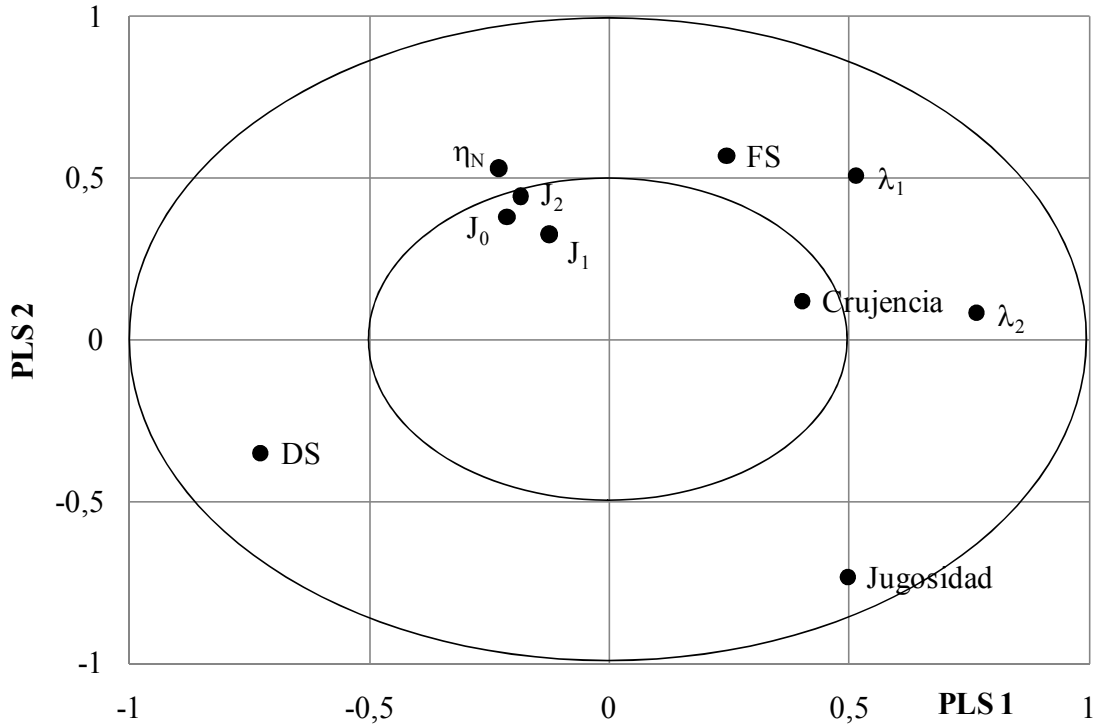


Figura 4-92. Correlación entre las variables de los ensayos de fluencia y los atributos sensoriales de tejido de manzana fresco, e inmerso en solución antipardeamiento, inmerso en solución antipardeamiento e irradiados con UV-C y control, almacenados en refrigeración a 4-5ºC.

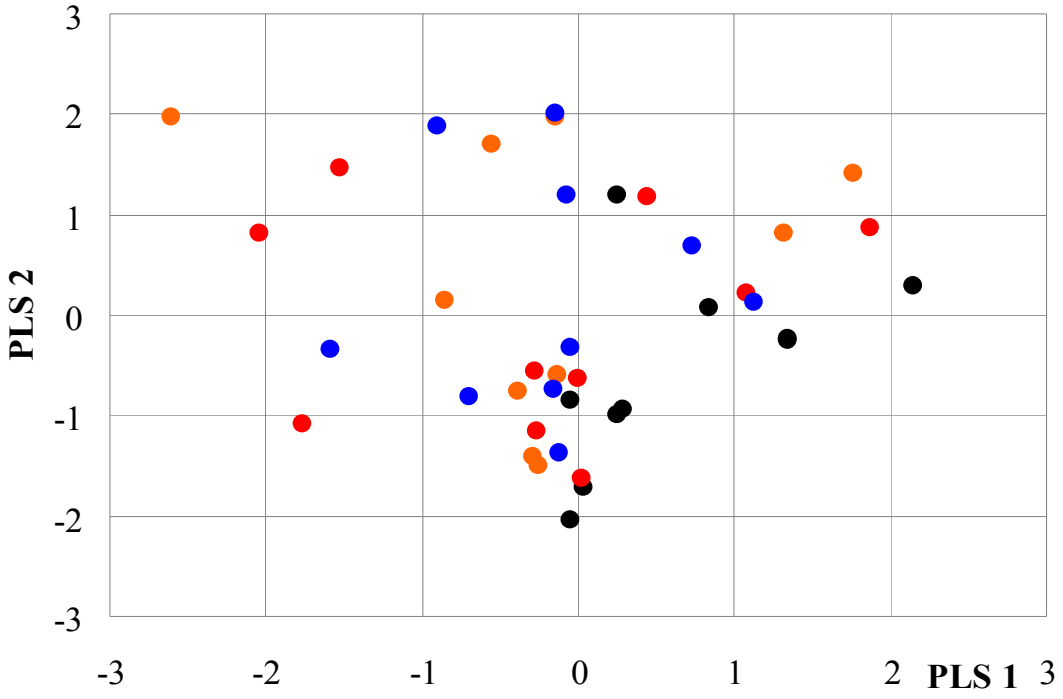


Figura 4-93. Ubicación de los tejidos de manzana fresco y tratados en función de la PLS 1 vs PLS 2. (●) fresco, e (●) inmerso en solución antipardeamiento (SA), (●) inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con UV-C (SA+UV-C) y (●) control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC.

4.4.2.4. Integración de los resultados obtenidos a través de los ensayos reológicos, la evaluación de la textura y la caracterización micro y ultraestructural.

Las muestras irradiadas con luz UV-C (con o sin solución antipardeamiento) y almacenadas en refrigeración 5 días presentaron leves modificaciones en las propiedades mecánicas. El almacenamiento refrigerado y los tratamientos SA y UV-C en tejido de manzana provocaron un leve aumento en la fracturabilidad y en la dureza. En cambio, el tejido con el tratamiento combinado (SA+UV-C) se comportó similar al control fresco. Estos resultados se correlacionaron con los cambios observados en la estructura del tejido de manzana irradiado (con o sin SA) almacenado durante 7 días reportado por Gómez (2010). Dicha autora observó que luego de siete días de almacenamiento, tanto los tejidos de las muestras tratadas (SA y SA+UV-C) como del control (C_7) presentaron colapso y plegamiento de paredes celulares (**Figura 4-94**). Las paredes del control almacenado se

visualizaron más teñidas que el control fresco (día 0) y en las observaciones de MET mostraron una mejor definición de la laminilla media, que aparecía como una línea fina muy densamente teñida (**Figura 4-95 B**) El citoplasma de estas células apareció levemente plasmolizado o con disrupciones de membranas, y en algunas regiones las paredes celulares presentaron ensanchamientos (**Figura 4-95 B**). La inmersión en la solución ácido ascórbico/cloruro de calcio no modificó en gran medida el tejido de manzana comparado al control. En algunas células se observó ruptura de membranas probablemente debido al efecto del corte. Las paredes celulares aparecieron densamente teñidas y con ondulaciones. El citoplasma apareció en algunas células con una leve plasmólisis (**Figura 4-94 C y 4-95 C**). En el tejido irradiado (SA+UV-C) las paredes celulares superficiales se visualizaron con buena densidad electrónica pero con plegamientos y ondulaciones pronunciados. Al igual que lo observado en el control, se visualizaron células que presentaron ensanchamientos de la pared celular en algunas zonas, separación del citoplasma de la pared celular, ruptura de membranas y formación de vesículas (**Figura 4-94 D y 4-95 D**). Pero a diferencia del control, no se observó en general en los tejidos irradiados una buena definición de la laminilla media.

La evaluación de textura oral no presentó cambios significativos en los tejidos irradiados con respecto al control fresco en la dureza, fracturabilidad y crujencia. El control al final del almacenamiento fue percibido como más duro y menos jugoso con respecto al control al día 0 y la muestra SA+UV-C fue caracterizada como menos jugosa.

La irradiación con luz UV-C es un tratamiento superficial que tiene baja penetración en el tejido, y los cambios observados se darían a nivel superficial. Como el análisis de textura (100% de compresión) se determina a grandes deformaciones, estas diferencias no pudieron ser totalmente apreciadas. Sin embargo utilizando ensayos instrumentales a bajas deformaciones fueron encontradas diferencias entre las muestras tratadas y control. También con los ensayos de doble compresión (70 % de compresión) fueron detectadas pequeñas diferencias entre las manzanas tratadas y el control.

Las rodajas de manzana expuestas a la luz UV-C presentaron una disminución de los módulos G' y G'' en relación con las muestras frescas (control), tanto al día 0 como al final del almacenamiento. Estas diferencias en el espectro mecánico podrían relacionarse entonces con una disminución de la turgencia del tejido irradiado como consecuencia de la ruptura de membranas celulares provocada por la radiación UV-C. Dicha pérdida se incrementó con la mayor pérdida de agua atribuible a la ruptura del tejido superficial y/o la

mayor velocidad de transpiración que presentaron los tejidos irradiados durante el almacenamiento (Gómez, 2010).

Los ensayos de fluencia-recuperación, al igual que los ensayos oscilatorios, fueron sensibles para detectar los cambios estructurales en el tejido irradiado. Estos resultados pueden ser analizados teniendo en cuenta la propuesta estructural de Alzamora y col. (2008). Las capacitancias J_0, J_1 y J_2 de las manzanas irradiadas se incrementaron significativamente durante el almacenamiento, mientras que en las muestras control no se observaron cambios significativos. Estos cambios en J_0 podrían ser relacionados en parte con la pérdida de turgor observada en el tejido irradiado, cuyas paredes aparecieron mucho más colapsadas a los 7 días de almacenamiento. Las observaciones realizadas con MET denotaron en paredes celulares plegadas y onduladas con poca definición de la laminilla media, lo que justificaría el aumento observado en las capacitancias (Gómez, 2010).

El análisis de regresión lineal de cuadrados mínimos parciales (PLS) encontró correlaciones entre los parámetros reológicos (fluencia y mecánicos) y los atributos texturales permitiendo corroborar las relaciones explicadas arriba con la estructura del tejido de manzana. Al igual que ocurrió en el estudio de los otros tratamientos, es importante destacar que los atributos texturales en todos los tratamientos evaluados fueron mejor explicados por los parámetros de fluencia.

En general las capacitancias J_0, J_1 y J_2 fueron negativamente correlacionadas con la crujencia, fracturabilidad sensorial, dureza sensorial y jugosidad. Estas correlaciones fueron consistentes con los cambios observados a nivel celular, es decir leve pérdida de la presión de turgor (menor crujencia, aumento de J_0 y disminución de G'); y paredes plegadas y onduladas (menor jugosidad, menor fracturabilidad y aumento de J_1 y J_2). Se encontraron claras correlaciones positivas entre crujencia y fracturabilidad instrumental y el área 2; y entre la dureza sensorial y los parámetros dureza, área 1, módulo de elasticidad.

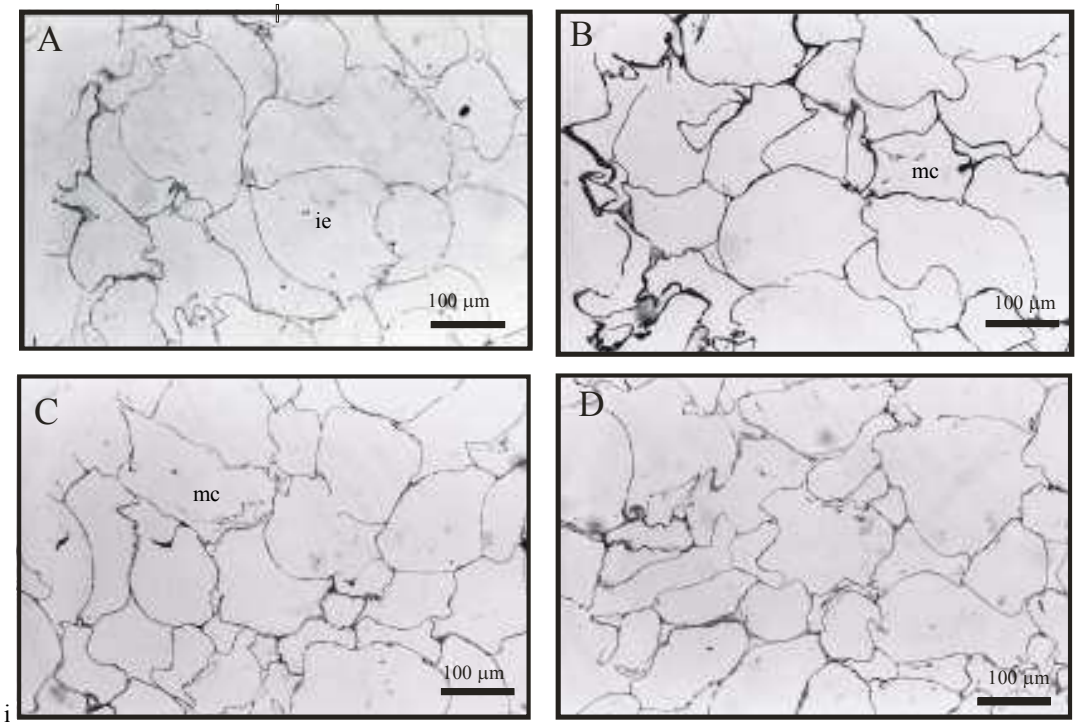


Figura 4-94. Imágenes de microscopía óptica de la superficie del tejido de manzana irradiado con luz UV-C con o sin pretratamientos, obtenidas al día 7 de almacenamiento. A: muestra fresca (día 0); B: control; C: inmersa en solución antipardeamiento; D: inmersa en solución antipardeamiento e irradiada 20 min. ie: espacio intercelular; mc: membrana celular. Fuente: Gómez (2010).

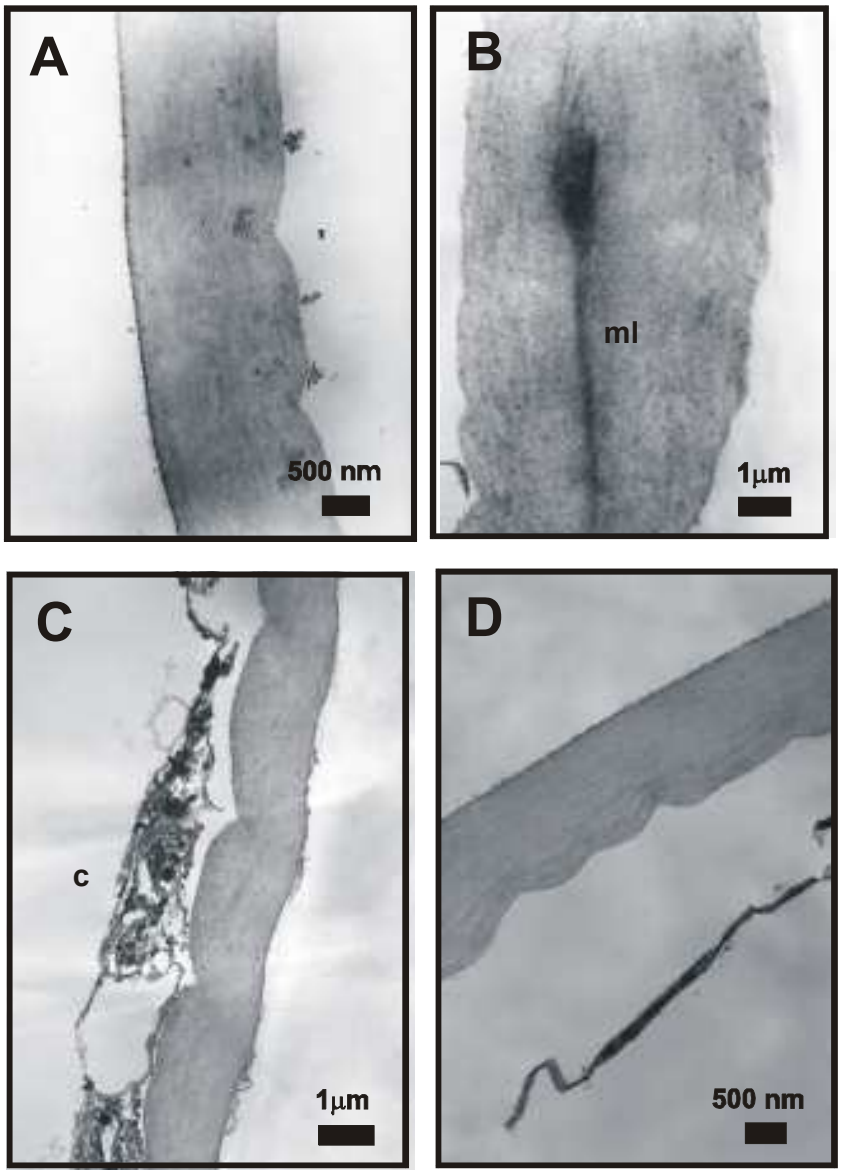


Figura 4-95. Imágenes de microscopía electrónica de transmisión de la superficie del tejido de manzana irradiado con luz UV-C con o sin pretratamientos, obtenidas al día 7 de almacenamiento. A: muestra fresca (día 0); B: control; C: inmersa en solución antipardeamiento; D: inmersa en solución antipardeamiento e irradiada 20 min. ml: laminilla media; c: citoplasma. Fuente: Gómez (2010).

4.4.3. Aplicación de pulsos de luz ultravioleta en tejido de manzana

El tejido de manzana fue pretratado con una solución antipardeamiento (1 % p/v de cloruro de calcio/ 1% p/v de acido ascórbico), y posteriormente con pulsos de luz ultravioleta de alta intensidad. Las muestras tratadas fueron almacenadas durante 5 días de acuerdo a lo descripto en **Materiales y Métodos sección 3.3.2.2.2**. Al igual que para el tratamiento de manzana con luz UV-C, en esta sección se evaluaron las propiedades reológicas a grandes deformaciones (ensayo de doble compresión) y la textura del tejido de manzana tratado para completar e integrar los resultados de investigaciones anteriores realizadas por Gómez (2010), quien evaluó las propiedades reológicas a bajas deformaciones (barrido de frecuencia y ensayos de fluencia y recuperación) y los cambios a nivel micro y ultraestructural. Al igual que en el estudio con radiación UV-C contínua reportado en la sección anterior, los cambios en las propiedades reológicas del tejido irradiado con LP, con o sin pretratamiento antipardeamiento, se detectaban principalmente después de algunos días de almacenamiento; por ello los ensayos se realizaron en las manzanas almacenadas en refrigeración durante 5 días.

Se evaluaron las siguientes muestras: el tejido fresco o control (C), el tejido control almacenado bajo refrigeración durante 5 días (C_5), el tejido tratado con solución antipardeamiento (SA) y almacenado bajo refrigeración durante 5 días, el tejido irradiado con luz pulsada (LP) y almacenado bajo refrigeración durante 5 días, y el tejido tratado con solución antipardeamiento y luz pulsada (SA+LP) y almacenado en refrigeración durante 5 días.

4.4.3.1. Propiedades reológicas

- **Ensayos de doble compresión**

El Perfil de Textura instrumental obtenido para los tejidos tratados y fresco se observa en la **Figura 4-96**. Todas las curvas correspondieron a muestras duras y fracturables, con un pico abrupto al comienzo del ensayo y uno más leve al final de la primera compresión. La manzana control presentó un incremento de la dureza con el tiempo de almacenamiento mientras que en las muestras tratadas se comportaron como el control.

A partir de las curvas experimentales se calcularon los parámetros característicos para cada muestra (**Tabla 4-61**). Haciendo un análisis de varianza multivariado de los parámetros se encontraron diferencias significativas ($F_{40,396}$ = 10,6; p<0,0001) entre el tejido fresco de manzana y los tejidos tratados con pulsos de luz o el tejido sin tratamiento almacenado.

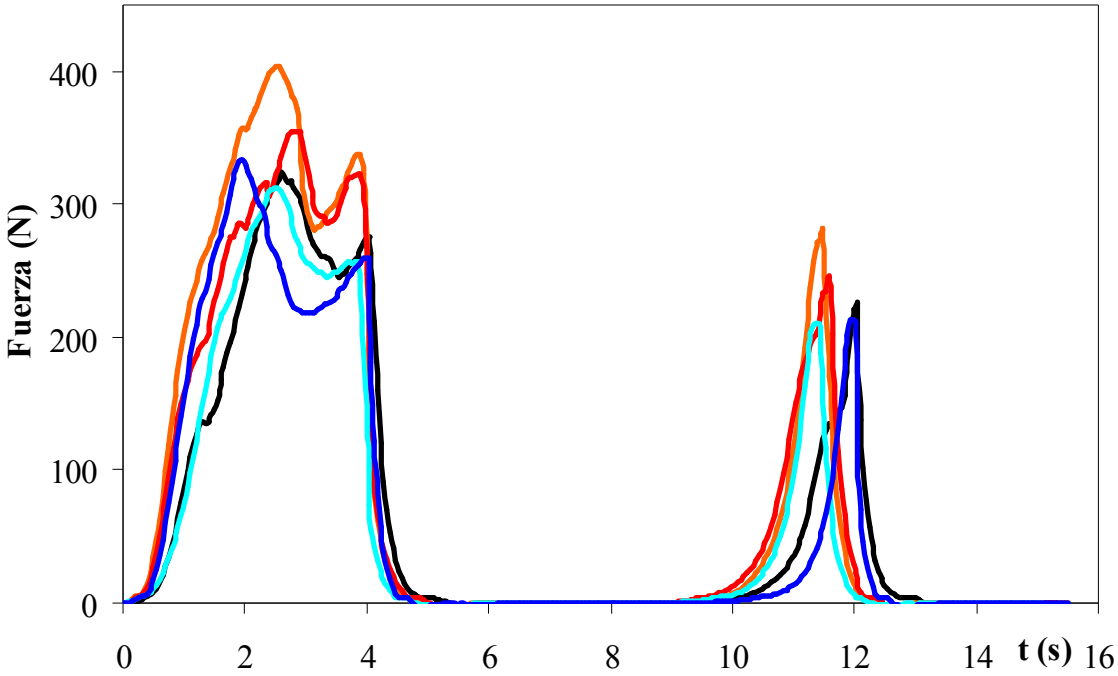


Figura 4-96. Curvas típicas de doble compresión de tejido de manzana fresco, e inmerso en solución antipardeamiento, irradiado con LP, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con LP y control, almacenados en refrigeración a 4-5ºC. (—) control, (—) control al día 5, (—) SA al día 5, (—) LP al día 5, (—) SA+LP al día 5.

Se observó un aumento de la fracturabilidad y de la dureza en las muestras refrigeradas y en las muestras inmersas en solución antipardeamiento. En cambio, las muestras tratadas con luz pulsada exhibieron valores similares a los del tejido fresco. El módulo de deformabilidad aumentó para las muestras C_5 y SA+LP y disminuyó levemente para las muestras SA y LP. Los aumentos o las disminuciones del módulo están asociados a ganancia o pérdida de rigidez del tejido de manzana.

El análisis de componentes principales de los parámetros texturales con las muestras (**Figura 4-97**) explicó el 94% de la variabilidad de los datos considerando las dos primeras componentes principales. La componente principal 1 explicó el 49,9 % y fue representada negativamente por fracturabilidad, dureza en la primera compresión, dureza en la segunda compresión, área de trabajo en la primera compresión y módulo de

deformabilidad. La PC 1 representa los cambios en la dureza y rigidez del tejido de manzana por efecto de la luz pulsada. La segunda componente explicó el 43,9% y fue definida positivamente por área de trabajo en la segunda compresión, cohesividad, gomosidad y masticabilidad (**Tabla 4-62, 4-63 y 4-64)**.

Las muestras C y SA fueron ubicadas en el cuadrante positivo de la CP 1 y CP 2, sus cambios más relevantes están asociados con las variables presentes en ese cuadrante. Las muestras C_5 fueron ubicadas en el cuadrante negativo de la CP 1 y positivo de la CP 2 caracterizando a la muestra como más dura, rígida y fracturable. La muestra SA+LP fue ubicada en el cuadrante negativo de la CP 1 y de la CP 2 y la muestra LP en el cuadrante positivo de la CP 1 y en el negativo de la CP 2. Estas últimas muestras no poseen propiedades predominantes.

Existió una alta correlación entre algunos parámetros texturales. Esta asociación es lógica ya que algunos parámetros son combinación de otros.

Tabla 4-61. Parámetros mecánicos promedio y su correspondiente desviación estándar de las curvas de doble compresión de tejido de manzana fresco (C), e inmerso en solución antipardeamiento (SA), irradiado con luz pulsada (LP), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con luz pulsada (SA+LP) y control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC.

Tratamiento	Fracturabilidad (N)	Dureza (N)	Dureza 2 (N)	Área 1 (J)	Área 2 (J)	Elasticidad (-)	Cohesividad (-)	Gomosidad (N)	Masticabilidad (N)	E_d (N/mm^2)	
C	334,7 ± 22,3	340,2 ± 20,6	235,5 ± 23,7	0,8 ± 0,1	0,13 ± 0,01	0,67 ± 0,04	0,16 ± 0,02	54,8 ± 6,9	36,6 ± 5,7	1,52 ± 0,25	a
C_5	362,1 ± 31,8	392,7 ± 38,2	276,8 ± 32,3	0,98 ± 0,12	0,11 ± 0,01	0,61 ± 0,05	0,12 ± 0,01	46,1 ± 5,1	27,6 ± 4,5	1,95 ± 0,27	b
SA	345,1 ± 47,2	385,13 ± 44,98	264,2 ± 37,8	0,9 ± 0,1	0,15 ± 0,01	0,64 ± 0,04	0,16 ± 0,01	61,3 ± 7,5	39,6 ± 6,5	1,4 ± 0,2	c
LP	337,7 ± 27,8	342,6 ± 28,5	242,9 ± 24,1	0,8 ± 0,1	0,09 ± 0,01	0,63 ± 0,04	0,11 ± 0,01	38,2 ± 5,4	24,2 ± 4,3	1,29 ± 0,23	d
SA+LP	339,2 ± 33,6	350,96 ± 34,36	250,6 ± 30,6	0,88 ± 0,11	0,11 ± 0,02	0,62 ± 0,05	0,11 ± 0,02	40,5 ± 8,1	25,3 ± 6,3	1,78 ± 0,28	e

Tratamientos con igual letra no presentan diferencias significativas con un 95 % de nivel de confianza.

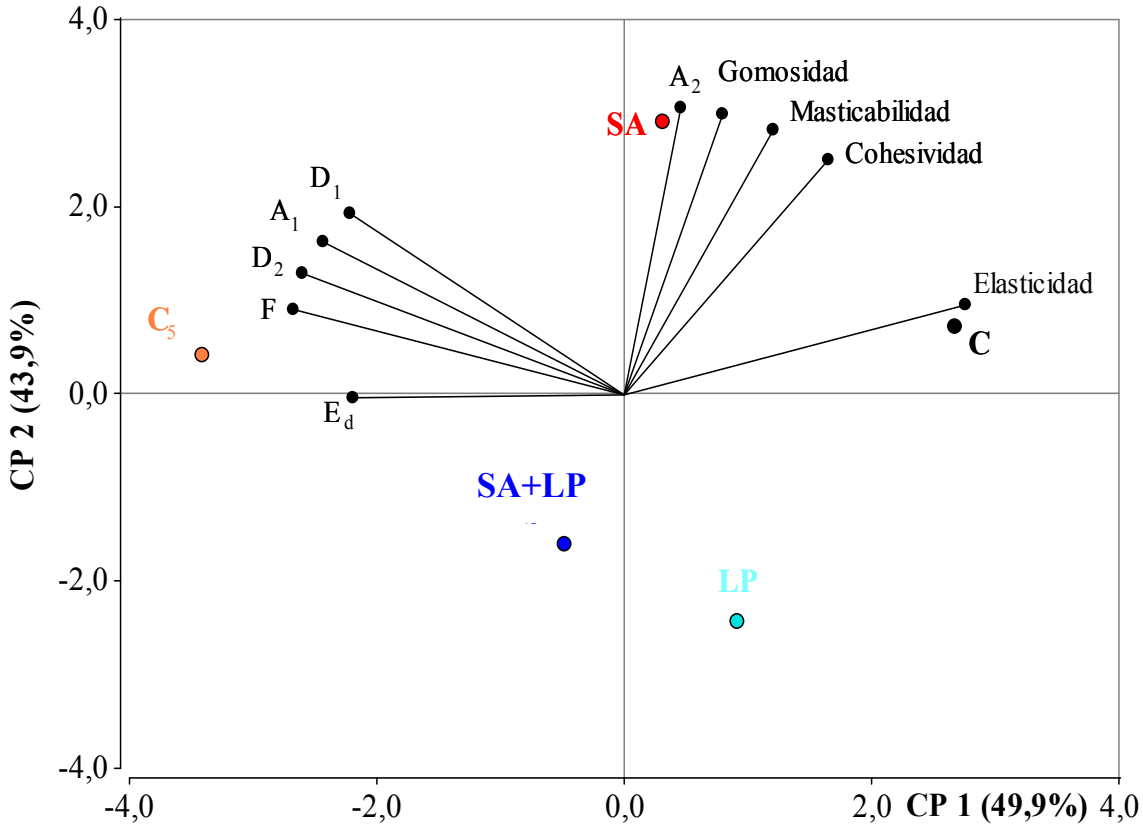


Figura 4-97. Análisis de componentes principales para los parámetros de las curvas de doble compresión de tejido de manzana fresco y tratado. (●) control (C), e (●) inmerso en solución antipardeamiento (SA), (●) irradiado con luz pulsada (LP), (●) inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con luz pulsada (SA+LP) y (●) control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC (C_5).

Tabla 4-62, 4-63 y 4-64. Autovalores, autovectores y correlaciones correspondientes al análisis PCA de los parámetros mecánicos de tejido de manzana fresco, e inmerso en solución antipardeamiento, irradiado con luz pulsada, inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con luz pulsada y control, almacenados en refrigeración a 4-5ºC.

Autovalores			
CP	Valor	Proporción	Prop. Acum.
1	4,99	0,5	0,5
2	4,39	0,44	0,94

Autovectores		
Variables	CP 1	CP 2
Fracturabilidad (F)	-0,41	0,14
Dureza (D_1)	-0,34	0,3
Dureza 2 (D_2)	-0,4	0,2
Area 1 (A_1)	-0,37	0,25
Area (A_2)	0,07	0,47
Elasticidad	0,43	0,15
Cohesividad	0,25	0,39
Gomosidad	0,12	0,46
E_d	0,19	0,43
Masticabilidad	-0,34	-0,01

Correlaciones con las variables originales		
Variables	CP 1	CP 2
Fracturabilidad (F)	-0,92	0,29
Dureza (D_1)	-0,76	0,62
Dureza 2 (D_2)	-0,89	0,42
Area 1 (A_1)	-0,84	0,53
Area (A_2)	0,16	0,98
Elasticidad	0,95	0,31
Cohesividad	0,57	0,81
Gomosidad	0,27	0,96
E_d	0,41	0,91
Masticabilidad	-0,75	-0,01

Valor en rojo representa la variable(s) más relevante(s) de la componente principal.

4.4.3.2. Análisis sensorial de textura

La textura oral de las muestras frescas, y de las muestras control, inmersas en solución antipardeamiento, e inmersas en solución antipardeamiento e irradiadas con luz pulsada almacenadas refrigeradas durante 5 días, fue determinada con un panel entrenado a través de los parámetros dureza, fracturabilidad, crujencia y jugosidad. La adhesividad al paladar no se determinó ya que los evaluadores no percibieron dicha propiedad en el tejido de manzana. La cohesividad no se tuvo en cuenta porque los cambios producidos en el tejido fueron a nivel superficial y dicha propiedad no presentaba modificaciones. En la **Tabla 4-65** se detallan los resultados obtenidos de las evaluaciones sensoriales.

Los tratamientos evaluados en el tejido de manzana no afectaron la dureza y la fracturabilidad del mismo. No se encontraron diferencias significativas para dureza ($F_{3,12}$=0,96; p = 0,43) y fracturabilidad ($F_{3,21}$=0,21; p = 0,88). En cambio, la crujencia y la jugosidad presentaron diferencias significativas entre las muestras. Los evaluadores percibieron una disminución significativa en la crujencia ($F_{3,21}$=3,70; p = 0,02) de la muestra SA+LP con respecto al control. No se encontraron diferencias significativas entre el control y SA y entre el control fresco y el tejido almacenado en refrigeración.

Tabla 4-65. Parámetros texturales promedio y su correspondiente desviación estándar del análisis sensorial de tejido de manzana fresco (C), e inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con LP (SA+LP) y control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC.

Tratamiento	Dureza	Fracturabilidad	Crujencia	Jugosidad
C	6,46±0,41[a]	5,88±2,93[a]	7,26±0,7[a]	6,16±0,55[a]
C_5	6,61±0,62[a]	6,03±2,87[a]	6,9±0,71[ab]	4,78±0,75[b]
SA	6,48±0,41[a]	5,89±2,87[a]	7,22±0,77[a]	5,16±0,77[b]
SA+LP	6,26±0,63[a]	5,91±2,94[a]	6,38±0,88[b]	4,99±0,94[b]

Medias de una misma columna con igual letra no presentan diferencias significativas con un 95 % de nivel de confianza.

La jugosidad disminuyó significativamente ($F_{3,15}$ = 11,1; p<0,0001) para las muestras tratadas y el control almacenado con respecto a la del control. No se encontraron diferencias significativas entre la jugosidad de los tejidos tratados.

Los juicios emitidos por el panel para la dureza, crujencia y jugosidad fueron consistentes y homogéneos. En cambio, se observó una gran dificultad entre los panelistas para evaluar la fracturabilidad en este tipo de muestras; por ende los juicios emitidos no fueron homogéneos ($F_{7,21}$ = 195; p<0,0001).

En la **Figura 4-98** se observa el perfil textural sensorial obtenido para el tejido de manzana fresco y los tejidos tratados indicando que los tratamientos evaluados provocaron una disminución en la jugosidad y en la crujencia. El tratamiento combinado de SA y LP fue el menos crujiente.

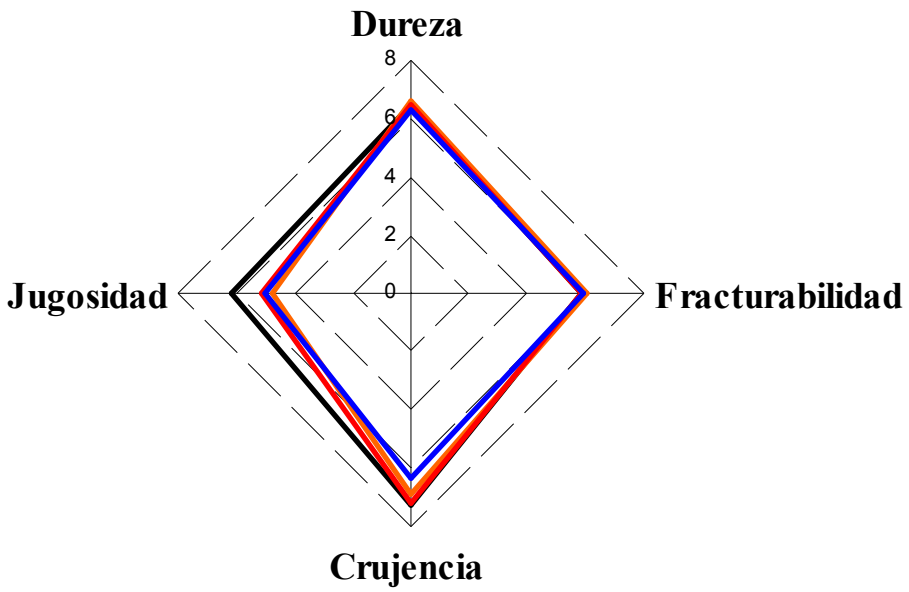


Figura 4-98. Perfil de Textura de tejido de manzana fresco, e inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con luz pulsada (SA+LP) y control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC. (▬) Control, (▬) Control al día 5, (▬) SA al día 5, (▬) SA+LP al día 5.

4.4.3.3. Correlación entre las propiedades reológicas y la textura utilizando regresión lineal de cuadrados mínimos parciales

Para correlacionar los atributos texturales con las propiedades reológicas se utilizó el análisis de regresión lineal por cuadrados mínimos parciales. Se correlacionaron los resultados de textura con los resultados de las propiedades mecánicas y con los resultados de los parámetros de las curvas de fluencia. Estos parámetros fueron extraídos de la tesis de Doctorado de Gómez (2010). Las curvas experimentales promedio de deformación vs tiempo para las muestras tratadas y control obtenidas por Gómez (2010) se observan en la **Figura 4-.99** Los parámetros obtenidos del modelo de Kelvin Voigt generalizado con dos elementos (J_0, J_1, J_2, λ_1, λ_2 y η_N) se muestran en la **Tabla 4-66.**

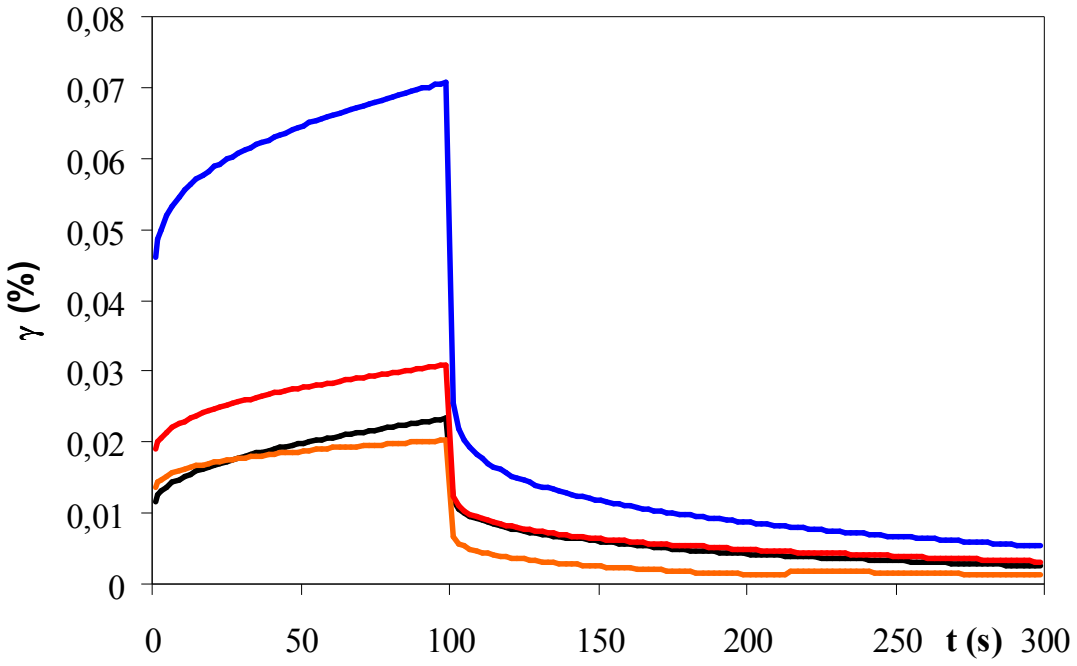


Figura 4-99. Curvas promedio de fluencia – recuperación de tejido de manzana fresco (C), e inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con LP (SA+LP) y control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC. (▬) control, (▬) control al día 7, (▬) SA al día 7, (▬) SA+LP al día 7. Fuente: Gómez (2010).

Gómez (2010) observó en los cilindros de manzana tratados almacenados 7 días los siguientes cambios:

- un aumento significativo en los valores de capacitancia instantánea o elástica (J_0) y viscoelástica J_1 en aquellas muestras que habían sido irradiadas, reflejando una mayor deformación de los tejidos.
- la capacitancia viscosa en estado estacionario ($1/\eta_N$) disminuyó al día 7 en el control y aumentó en las muestras con el tratamiento antipardeamiento (con o sin irradiación), denotando una reducción y un incremento de la fluidez respectivamente. Las diferencias observadas fueron pequeñas y los valores de fluidez exhibieron grandes errores asociados.
- los tiempos de retardo de los dos elementos de Voigt (λ_1 y λ_2) no variaron significativamente entre las diferentes muestras, por lo tanto, la velocidad de la respuesta de los elementos estructurales asociados no se vió afectada ni por los tratamientos ni por el almacenamiento

- Los incrementos en la capacitancia total al final de la fase de fluencia al día 7 en las muestras tratadas en relación al tejido fresco (control día 0) fueron de ≈ 134 % para las rodajas inmersas en SA sin irradiar, de ≈ 220 % para las expuestas a la LP y de ≈ 310 % para las rodajas expuestas a la LP previamente tratadas con SA.

Tabla 4-66. Parámetros promedio y su correspondiente desviación estándar de las curvas de fluencia* de tejido de manzana fresco (C), e inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiada con LP (SA+ LP) y control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC durante 7 días.

Tratamiento	J_0 (1/Pa) (x 10^6)	J_1 (1/Pa) (x 10^6)	J_2 (1/Pa) (x 10^6)	λ_1 (s)	λ_2 (s)	η_N (Pa.s) (x 10^{-8})
C	3,1 ± 0,9 40%**	1,4 ± 0,7 21%**	0,7 ± 0,3 10%	26,4 ± 3,9	2,6 ± 0,5	0,7 ± 0,5 21%
C_7	4,1 ± 0,9 53%**	1,1 ± 0,4 14%**	1,9 ± 1,8 25%**	30,30 ± 13,4	2,6 ± 0,6	1,7 ± 0,8 8%**
SA	5,2 ± 1,4 59%**	1,4 ± 0,7 16%**	0,9 ± 0,3 10%**	19,1 ± 5,7	1,9 ± 0,7	0,8 ± 0,8 15%**
SA + LP	13,0± 5,2 62%**	3,1 ± 1,8 15%**	2,2 ± 0,9 11%**	21,3 ± 3,9	2,6 ± 0,9	0,4± 0,2 12%**

* Parámetros obtenidos a partir de la ecuación 3-5.
** Contribución relativa de cada tipo de capacitancia a la capacitancia total al final de la etapa de fluencia. Fuente: Gómez (2010).

4.4.3.3.1. Propiedades mecánicas (TPA)

Se utilizaron los atributos texturales dureza (DS), fracturabilidad (FS), jugosidad y crujencia como variables Y o dependientes, y las parámetros obtenidos del TPA (dureza, fracturabilidad, dureza 2, área 1, área 2, cohesividad, elasticidad, gomosidad, masticabilidad y modulo de deformabilidad) como variables X o independientes.

El modelo de regresión de cuadrados mínimos parciales con cuatro factores logró explicar el 72 % de la variabilidad de los atributos texturales a través de los parámetros instrumentales. El factor PLS 1 logró explicar el 35 %, el factor PLS 2 el 14 %, el factor PLS 3 el 15% y el factor PLS 4 el 7%.

Analizando el modelo propuesto, los atributos mejores explicados considerando los cuatro factores fueron jugosidad y dureza (20,7 y 19,7 % de la varianza explicada

respectivamente) mientras que la crujencia y fracturabilidad (14,5 % y 14,7 % de la varianza explicada respectivamente) fueron menos explicados (**Figura 4-100**). Los bajos porcentajes observados se explican a través de las pocas diferencias encontradas entre las muestras en los atributos texturales.

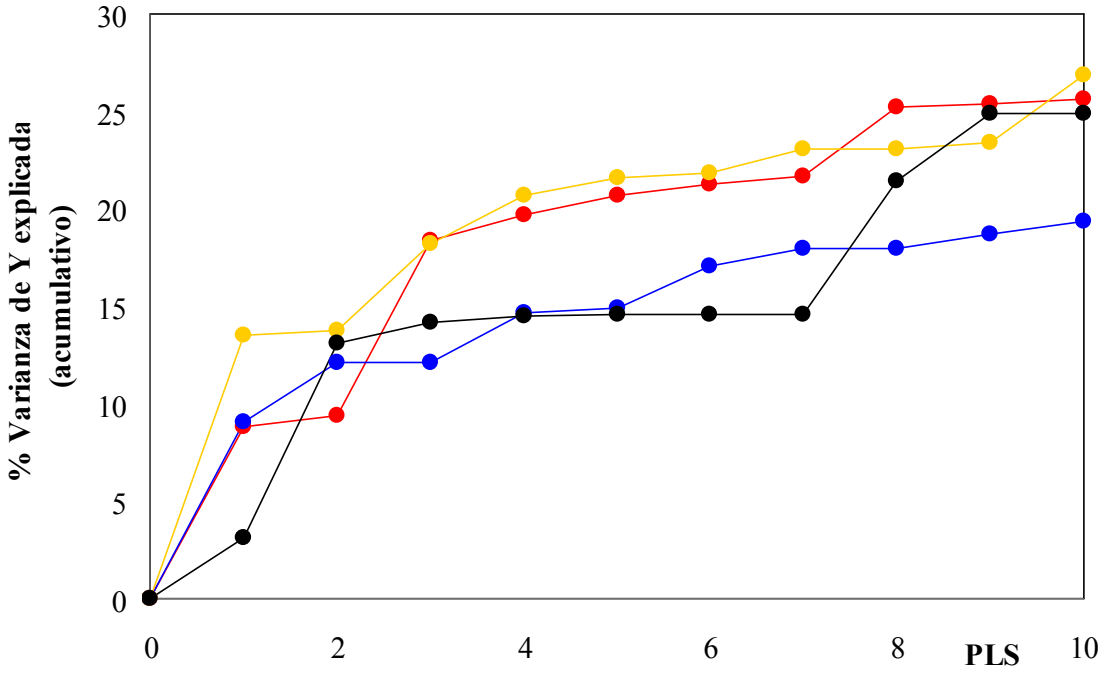


Figura 4-100. Porcentaje de varianza de los atributos sensoriales explicada por los parámetros mecánicos de tejido de manzana fresco, e inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con luz pulsada (SA+LP) y control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC. (—) crujencia, (—) dureza, (—) jugosidad, (—) fracturabilidad.

Las correlaciones entre las variables sensoriales e instrumentales se observan en la **Figura 4-101**. Analizando la ubicación de las variables sobre el eje PLS 1 se observa que las parámetros dureza (D_1), dureza 2 (D_2), fracturabilidad (F), área 1 (A_1) están positivamente relacionadas con la fracturabilidad y dureza sensorial (FS, DS) y negativamente relacionados con la jugosidad. A lo largo del eje PLS 2 no se encontraron relaciones entre las variables.

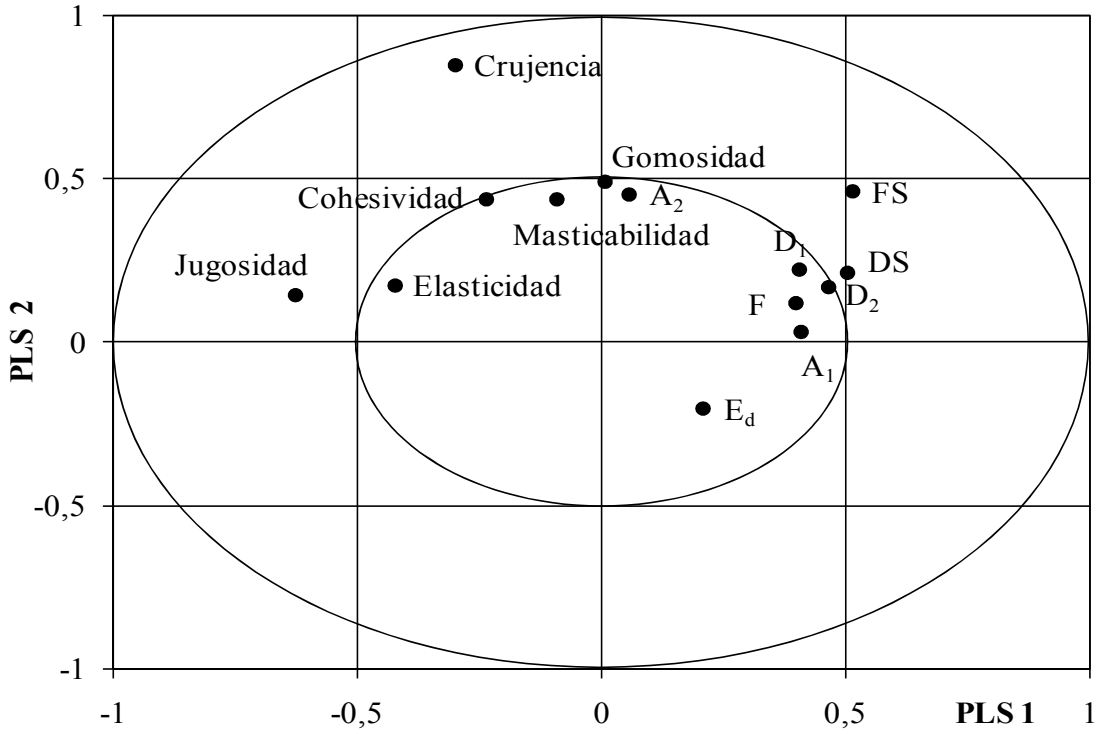


Figura 4-101. Correlación entre las variables obtenidas del TPA y los atributos sensoriales para el tejido de manzana fresco, e inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con luz pulsada (SA+LP) y control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC.

Analizando la **Figura 4-102** no se observó una tendencia en la ubicación de las muestras de manzana en función las los factores PLS 1 y PLS 2. Este comportamiento era esperado dadas a las pocas diferencias encontradas en los atributos texturales de las muestras de manzanas fresca e irradiadas.

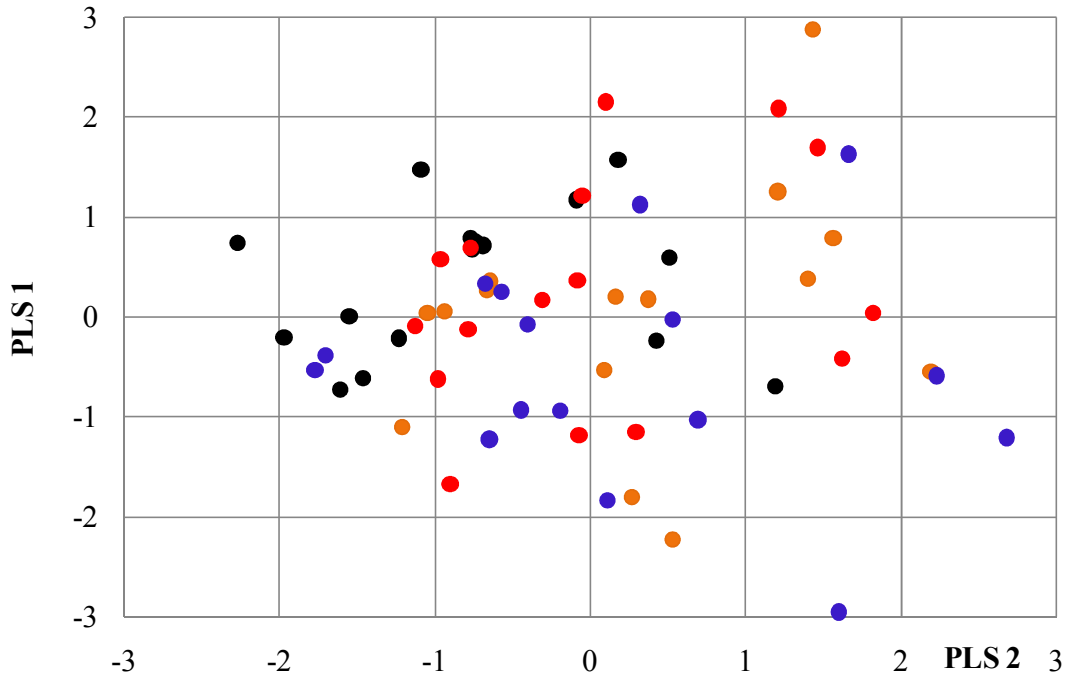


Figura 4-102. Ubicación del tejido de manzana fresco y tratado en función de la PLS 1 vs PLS 2. (●) fresco, e (●) inmerso en solución antipardeamiento (SA), (●) inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con luz pulsada (SA+LP) y (●) control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC

4.4.3.3.2. Parámetros de fluencia

Se analizó la correlación entre los parámetros de las curvas de fluencia (variables independientes) y los atributos texturales (variables dependientes). El modelo de regresión lineal de cuadrados mínimos parciales con cuatro factores logró explicar el 82 % de la variabilidad de los atributos texturales a través de los parámetros de las curvas de fluencia. El factor PLS 1 explicó el 29%, el factor PLS 2 el 31%, el factor PLS 3 el 6% y el factor PLS 4 el 15 %. Como la inclusión de nuevos factores al modelo no mejoraba la predicción no fueron considerados en el mismo.

Con el modelo propuesto por cuatro factores los atributos crujencia y jugosidad (18 y 16,8 % de la varianza explicada respectivamente) fueron los mejores explicados mientras que dureza y fracturabilidad sensorial fueron poco explicadas (10,9 y 4,6 % de varianza explicada respectivamente) (**Figura 4-103**).

Las correlaciones entre las variables sensoriales e instrumentales se observan en la **Figura 4-104**. Analizando la ubicación de las variables a través del eje PLS 1 se observa que los parámetros J_0, J_1 y J_2 están negativamente correlacionados con la crujencia; y que el parámetro η_N esta inversamente relacionado con la jugosidad. En el eje PLS 2, el tiempo de retardo 2 (λ_2) está positivamente relacionado con la jugosidad y negativamente relacionado con la dureza sensorial.

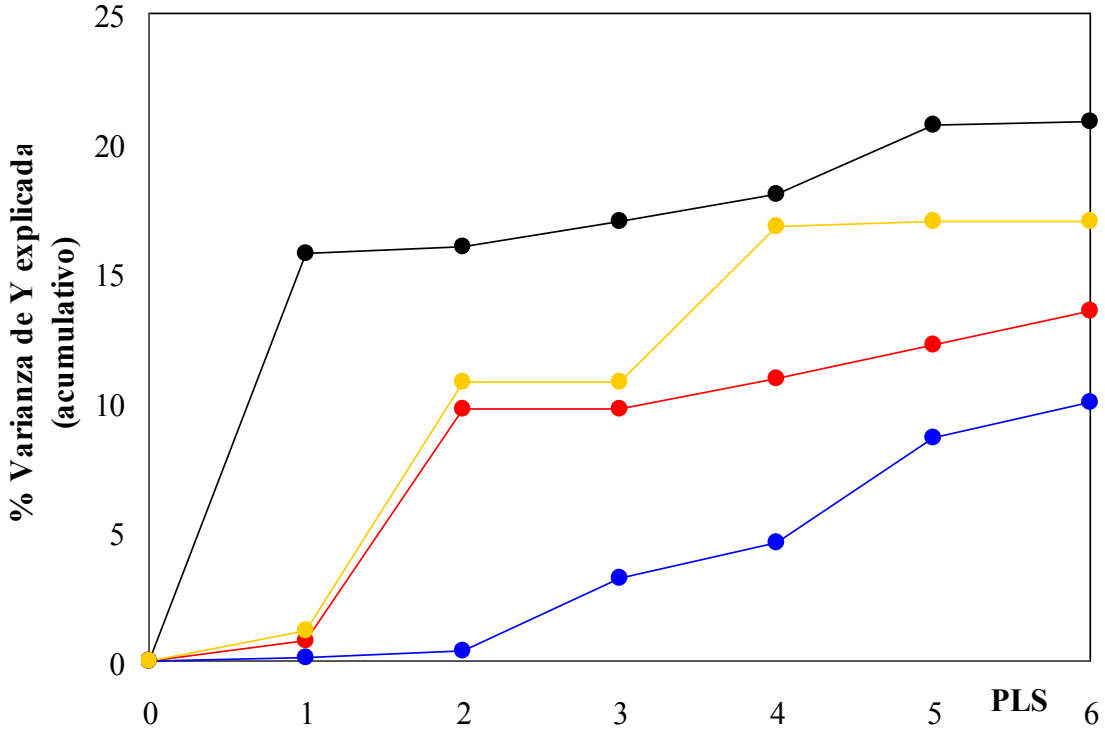


Figura 4-103. Porcentaje de varianza de los atributos sensoriales explicada por los parámetros de fluencia de tejido de manzana fresco, e inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con luz pulsada (SA+LP) y control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC durante 5 días. (—) crujencia, (—) dureza, (—) jugosidad, (—) fracturabilidad.

No se observó una tendencia en la ubicación de las muestras de manzana en función de los factores PLS 1 y PLS 2 **(Figura 4-105)**. Este comportamiento era esperado dadas las pocas diferencias encontradas en los atributos texturales de las muestras de manzana.

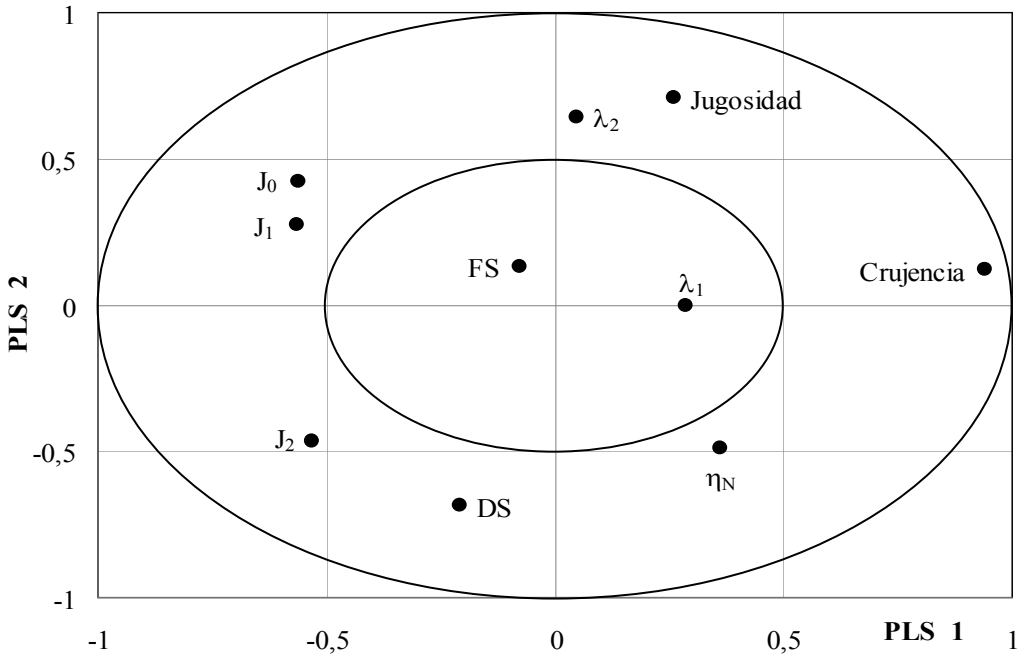


Figura 4-104. Correlación entre las variables de los ensayos de fluencia y los atributos sensoriales para el tejido de manzana fresco, e inmerso en solución antipardeamiento (SA), inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con luz pulsada (SA+LP) y control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC.

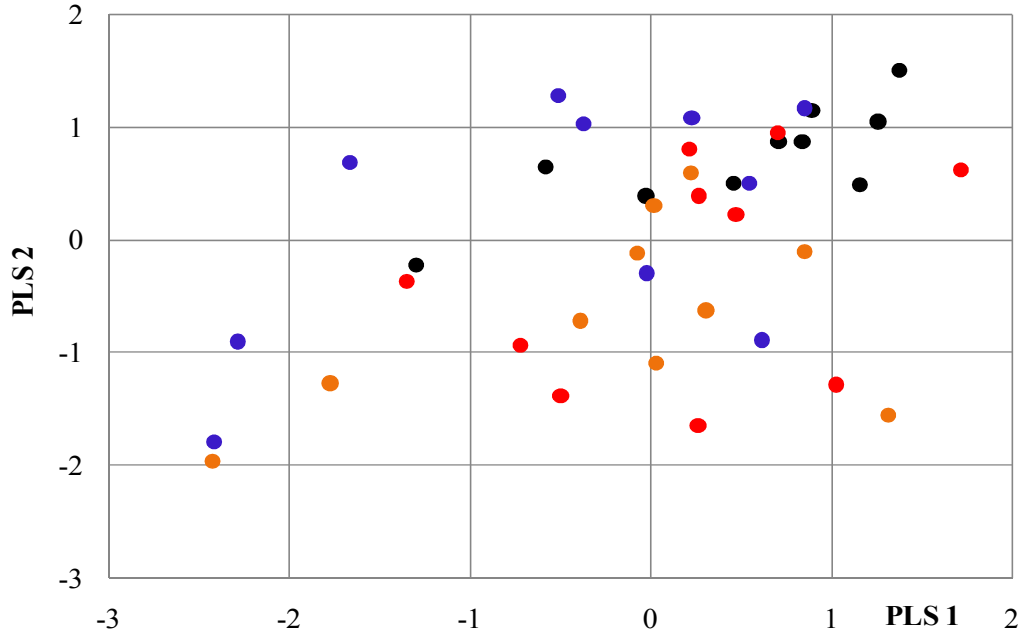


Figura 4-105. Ubicación del tejido de manzana fresco y tratado en función de la PLS 1 vs PLS 2. (●) fresco, e (●) inmerso en solución antipardeamiento (SA), (●) inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con luz pulsada (SA+LP) y (●) control (C_5), almacenados en refrigeración a 4-5ºC.

4.4.3.4. Integración de los resultados obtenidos a través de los ensayos reológicos, la evaluación de la textura y la caracterización micro y ultraestructural.

Las muestras tratadas con luz pulsada (con o sin solución antipardeamiento) presentaron leves modificaciones en las propiedades mecánicas. El control al final del almacenamiento mostró un leve aumento en la fracturabilidad, dureza y módulo de deformabilidad. La textura oral entre las muestras no presentó cambios en la dureza y la fracturabilidad; en cambio, la crujencia y la jugosidad del tejido de manzana fueron afectadas. La crujencia y la jugosidad disminuyeron con respecto al control fresco en los tejidos pretratados con solución antipardeamiento y luego irradiados con luz pulsada. Además la jugosidad disminuyó al final del almacenamiento para el control y las muestras SA.

Los cambios observados en la textura del tejido de manzana tratado pudieron ser correlacionados con los cambios observados en la estructura del tejido por Gómez (2010). Dicha autora reportó que los tejidos de las muestras control almacenados en refrigeración durante una semana presentaron paredes celulares con cierto grado de plegamiento pero con una mayor densidad óptica que la observada en el tejido fresco al día 0 (**Figura 4- 106 A y B**). Este mismo efecto del almacenamiento fue observado también en los tejidos correspondientes a las muestras que fueron inmersas en la solución antipardeamiento (**Figuras 4-106 C**). Los tejidos irradiados (con pretratamiento antipardeamiento) se visualizaron luego de los siete días de almacenamiento con una disrupción generalizada. Las células aparecieron muy colapsadas, con ruptura de membranas celulares y paredes con disrupciones y con plegamientos pronunciados, en parte atribuibles a la pérdida de presión de turgor (**Figuras 4-106 D**). También fue muy notoria la menor tinción de las paredes celulares, tanto en la zona de unión de dos células como en las zonas de adhesión de tres células. Ello indicaría un efecto del tratamiento a nivel de las sustancias pécticas de la pared celular, incrementado a lo largo del almacenamiento. Las paredes de las células inmersas en la SA e irradiadas se mostraron además más hinchadas.

Además Gómez (2010) reportó que la irradiación provocó cambios en la conducta viscoelástica del tejido de manzana. Los valores del módulo elástico (G') y del módulo de almacenamiento (G") disminuyeron al final del almacenamiento (7 días) para todas las muestras tratadas. Este comportamiento podría relacionarse con una disminución de la turgencia del tejido irradiado como consecuencia no sólo de la ruptura de membranas celulares durante la irradiación, sino también, de la pérdida de agua por evaporación que

sufrieron las muestras durante la irradiación al incrementarse la temperatura. También contribuiría el debilitamiento de las paredes celulares.

Los parámetros viscoelásticos de las curvas de fluencia al final del almacenamiento revelaron cambios en las características viscoelásticas del tejido de manzana irradiado en relación al tejido fresco (control). Las capacitancias instantánea o elástica (J_0) y viscoelástica J_1 presentaron un aumento significativo, reflejando la mayor deformabilidad de estos tejidos. A nivel estructural estos cambios estarían asociados con la ruptura de membranas celulares y con el debilitamiento de las paredes celulares, visualizadas con baja densidad en los tejidos irradiados al día 7. Las alteraciones producidas en la pared por la LP se intensificaron durante el almacenamiento (paredes muy plegadas, con importantes disrupciones) y las paredes aparecieron también más hinchadas, indicando una exosmosis importante que aumentaría el valor de l/η_N.

El análisis de regresión lineal de cuadrados mínimos parciales (PLS) encontró claras correlaciones entre los parámetros reológicos (fluencia y mecánicos) y los atributos texturales permitiendo corroborar las relaciones explicadas arriba con la estructura del tejido de manzana. Debe notarse que los atributos texturales en todos los tratamientos evaluados fueron mejor explicados por los parámetros de fluencia.

En general las capacitancias J_0, J_1 y J_2 fueron negativamente correlacionadas con la crujencia y el parámetro η_N fue negativamente correlacionado con la jugosidad. Estas correlaciones fueron consistentes con los cambios observados a nivel celular, es decir pérdida de la presión de turgor (menor crujencia, aumento de J_0 y disminución de G'); paredes muy plegadas y onduladas con importantes alteraciones en la densidad electrónica (menor jugosidad y aumento de J_1 y J_2); mayor η_N (mayor viscosidad y menor jugosidad). Claras correlaciones positivas fueron encontradas entre los parámetros instrumentales fracturabilidad, dureza, área 1 y dureza 2 con la dureza y fracturabilidad sensorial; y negativas con la jugosidad.

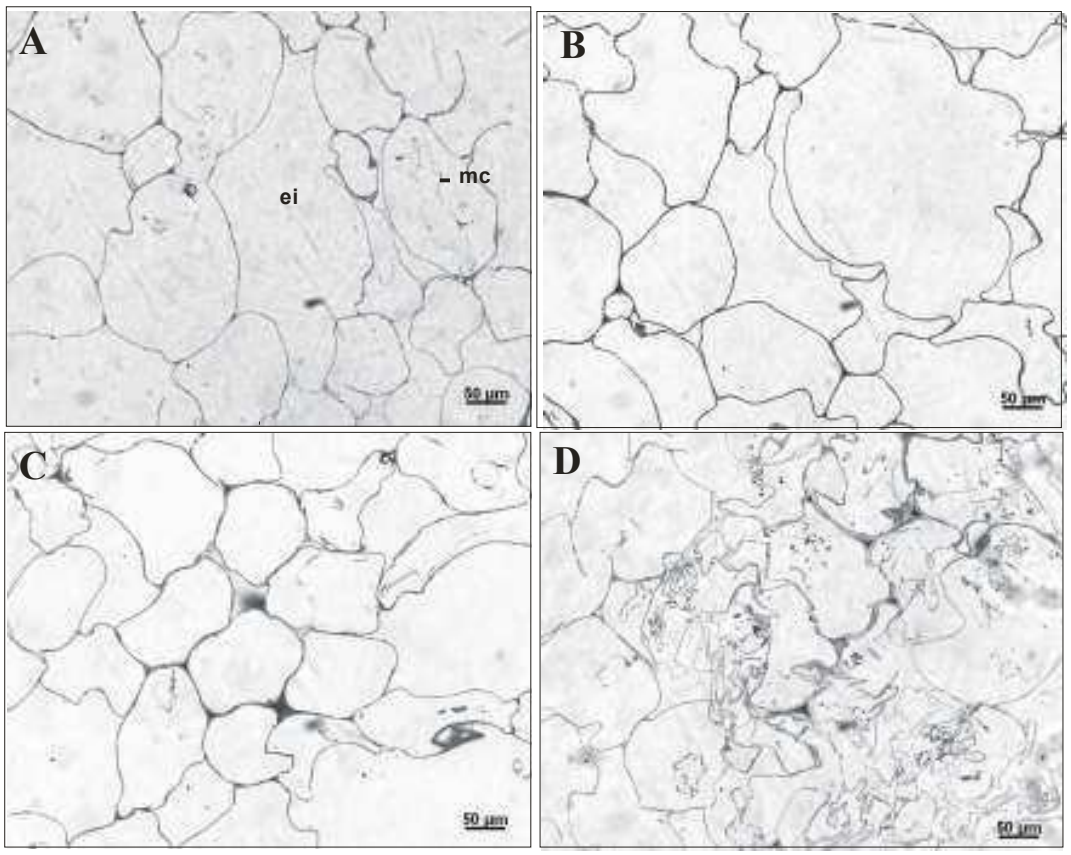


Figura 4-106. Imágenes de microscopía óptica de la superficie del tejido de manzana irradiado con LP con o sin pretratamientos, obtenidas al día 7 de almacenamiento. A: fresco (día 0); B: control almacenado; C: inmerso en solución antipardeamiento; D: inmerso en solución antipardeamiento e irradiado con LP. ie: espacio intercelular; mc: membrana celular. Fuente: Gómez (2010).

4.5. Comparación entre los valores sensoriales predichos por los modelos (instrumental-sensorial) y los valores observados por el panel sensorial

Todas las muestras estudiadas (tratamientos volumétricos y superficiales) en esta tesis fueron instrumentalmente evaluadas con el ensayo de doble compresión. Los parámetros dureza, fracturabilidad y cohesividad obtenidos en este ensayo fueron utilizados para predecir el valor sensorial con los modelos obtenidos en la **sección Resultados 4.2.2**.

Para las muestras C, E1, E2, DOA, E+DOA, DOA+Ca^{+2} y E+DOA+Ca^{+2} se observó que los valores sensoriales predichos por los modelos para dureza y fracturabilidad fueron 1 ó 2 puntos más altos que los valores observados por el panel sensorial (**Tabla 4-67**). Cuando se evaluaron las muestras de manzana tratadas con luz UV-C y luz pulsada (C, C_5, SA, SA+UV-C y SA+LP) se encontró también que las predicciones eran más altas que los valores observados. Si se comparan las predicciones para las muestras con ambos tratamientos, volumétricos y superficiales, los valores predichos para las muestras tratadas con los tratamientos superficiales fueron levemente más altos que los valores encontrados para las muestras con los tratamientos volumétricos.

Una de las causas para la obtención de valores predichos más altos podría atribuirse a que el tamaño utilizado en las manzanas tratadas (cilindros de 3 cm de diámetro y 1cm de espesor para los tratamientos volumétricos y de 0,06 cm de espesor para los superficiales), fue diferente al tamaño utilizado en las muestras de referencia de las escalas (tamaños más pequeños ≈ 1 cm^3). Se ha reportado en la literatura que la relación fuerza-tiempo obtenida de los ensayos de compresión uniaxial es dependiente de las dimensiones de la muestra. Especímenes con mayores diámetros desarrollan mayores tensiones aparentes (Costell y col., 1997).

La utilización de un espesor diferente para los tratamientos superficiales podría explicar la diferencia encontrada entre el valor predicho del control fresco de estos tratamientos y el predicho de los tratamientos volumétricos (valor más bajo).

Los valores predichos de cohesividad para los tratamientos volumétricos y superficiales fueron para algunos casos negativos y para otros valores muy bajos (≈0,1). Este comportamiento era esperado para el tejido de manzana y pera (tejidos con poca elasticidad) debido a los problemas encontrados en la sección **Resultados 4.2** con la medida instrumental (A_2/A_1) de algunas muestras de referencia (muestras cohesivas con poca elasticidad) de la escala de cohesividad.

Cuando se evaluaron las muestras de pera para los atributos de dureza y fracturabilidad se observó que el modelo predecía valores negativos para la dureza y valores muy bajos para la fracturabilidad. El tejido de pera comparado con la manzana es mucho más blando y presenta menor resistencia mecánica. Si se evalúan ambas escalas de textura, algunos valores instrumentales de pera caen por debajo del primer punto del modelo obteniéndose valores negativos. Por lo tanto, para tejidos muy blandos como la pera, el melón o la sandia, es necesario desarrollar una escala de dureza y fracturabilidad específica para tejidos vegetales (alimentos de alta humedad) que amplíe el rango de valores bajos, para que pueda predecirse por interpolación y no por extrapolación.

Tabla 4-67. Promedio y desvío estándar del valor sensorial observado y predicho por el modelo para el tejido de manzana fresco y tratado.

Tratamientos volumétricos	**Valor observado**		**Valor predicho**	
	Dureza	**Fracturabilidad**	**Dureza**	**Fracturabilidad**
C	6,9 ± 0,6	7,9 ± 0,7	9,6 ± 1,33	9,2 ± 1,75
E1	5,9 ± 0,9	5,6 ± 0,6	7,28 ± 1,12	7,73 ± 1,57
E2	4,4 ± 1,1	4,3±0,5	4,84 ± 1,05	-----
DOA	7,07±1,19	5,78±2,08	9,89 ± 1,38	9,39 ± 1,79
E+DOA	6,27±0,85	4,71±2,49	9,15 ± 1,31	-----
DOA+Ca^{+2}	7,2±0,5	6,61±1,75	9,58± 1,39	9,19 ± 1,8
E+DOA+Ca^{+2}	6,86±0,83	5,6±1,5	9,03 ± 1,33	-----
Tratamientos superficiales	**Valor observado**		**Valor predicho**	
	Dureza	**Fracturabilidad**	**Dureza**	**Fracturabilidad**
C	6,06 ± 0,58	6,75 ± 0,79	9,95 ± 1,36	9,37 ± 1,7
C_5	6,47 ± 0,52	8,21 ± 1,33	10,58 ± 1,43	9,58 ± 1,81
SA	6,22 ± 0,44	7,29 ± 0,73	10,5± 1,47	9,46 ± 1,85
SA+UV-C	6,4 ± 0,35	7,03 ± 0,55	9,93 ± 1,43	9,38 ± 1,83
SA+LP	6,26±0,63	5,91±2,94	10,08 ± 1,41	9,4± 1,8

5. CONCLUSIONES

5.1. Panel sensorial

- Se entrenó a un grupo de personas para formar un panel de textura. En general las evaluaciones fueron homogéneas entre los evaluadores indicando la consistencia del panel.
- Se chequearon instrumental y sensorialmente algunas escalas de referencia de textura utilizando ó adaptando estándares definidos para países fuera de USA. Se encontraron correlaciones no lineales útiles entre la medida instrumental y el valor sensorial para definir algunos atributos de textura de alimentos argentinos. Dichas correlaciones fueron correctamente validadas mediante la medición en nuevos alimentos. Se observaron algunos problemas con las determinaciones de cohesividad en muestras levemente elásticas y con las evaluaciones en adhesividad en muestras sensibles a pequeños cambios de temperatura. Las medidas instrumentales de cohesividad fueron confiables en muestras elásticas y sería importante desarrollar en el futuro una medida instrumental representativa de la cohesividad en muestras no elásticas. En el caso de alimentos viscoelásticos, las definiciones de cohesividad instrumental y sensorial no representarían el mismo concepto, y por ende, las medidas sensoriales e instrumentales de cohesividad no se correlacionaron entre sí en la presente tesis.

5.2. Tratamientos volumétricos

- El escaldado en vapor durante 90 y 150 segundos influenció fuertemente a la mayoría de las propiedades reológicas del tejido de manzana. A nivel estructural se observó ruptura de membranas y degradación de paredes celulares en las muestras. Los espectros mecánicos mostraron un descenso del módulo de almacenamiento para los tejidos escaldados indicando una pérdida de la rigidez. A su vez se observó una importante disminución en los valores de las propiedades mecánicas. Estos cambios pudieron ser percibidos por el panel entrenado a través de los parámetros texturales evaluados. Los cambios observados en las propiedades reológicas pudieron ser relacionados y explicados a través de las modificaciones observadas en la estructura del tejido de manzana.
- Los tratamientos de deshidratación osmótica no dañaron las paredes celulares y la estructura celular del tejido. En general se observó una leve alteración de las propiedades reológicas y texturales para las muestras que no fueron escaldadas

previamente comportándose de manera similar al control. En cambio, en las muestras que fueron previamente calentadas se presentaron cambios más relevantes. Estos cambios pudieron ser detectados con todas las técnicas sensoriales e instrumentales utilizadas y se encontraron importantes relaciones entre la textura y las propiedades reológicas con los cambios estructurales observados.

- La incorporación de calcio durante la deshidratación osmótica provocó un reforzamiento de la pared celular y de la laminilla media del tejido de manzana. Sin embargo el comportamiento reológico y textural fue bastante similar al observado en las muestras deshidratadas sin calcio.
- El análisis de regresión lineal de cuadrados mínimos parciales (PLS) encontró claras correlaciones entre los parámetros reológicos (fluencia y mecánicos) y los atributos texturales permitiendo corroborar las relaciones con la estructura del tejido de manzana. Los atributos texturales en todos los tratamientos evaluados fueron mejor explicados por los parámetros de fluencia.

5.3. Tratamientos superficiales

- La radiación UV-C produjo cambios menores en el comportamiento reológico de las rodajas de manzana, asociados con una pérdida de rigidez del tejido. Los ensayos de doble compresión y los de fluencia/recuperación fueron sensibles para detectar estos cambios. Sin embargo, los evaluadores prácticamente no percibieron diferencias significativas en los atributos de textura en las muestras. Por otra parte, debido a la baja penetración de la radiación UV-C, los cambios encontrados (paredes celulares plegadas, onduladas, y en algunas zonas ensanchadas, separación del citoplasma, ruptura de membranas y formación de vesículas) se darían fundamentalmente en las regiones superficiales de las muestras expuestas a la irradiación.
- La exposición a la luz pulsada (con o sin SA) en el tejido de manzana también indujo modificaciones a lo largo del almacenamiento en la conducta reológica del tejido de manzana asociadas a una disminución en la rigidez, sobre todo en las regiones más superficiales de las muestras. Las propiedades mecánicas fueron levemente afectadas pero los atributos texturales no presentaron diferencias significativas entre las muestras.
- La radiación de UV-C en el tejido de pera (con SA y H_2O_2) produjo severa degradación en la pared celular y disrupción en la laminilla media. Los espectros mecánicos mostraron un descenso del módulo de almacenamiento siendo éste más marcado para

los tejidos pretratados con H_2O_2. También se observaron cambios en las propiedades mecánicas. Sin embargo estos cambios no fueron percibidos en forma significativa por el panel entrenado a través de los parámetros texturales evaluados. Los cambios observados en las propiedades reológicas pudieron ser relacionados y explicados con los cambios observados en la estructura del tejido de pera.

- El análisis de regresión lineal de cuadrados mínimos parciales (PLS) encontró correlaciones entre los parámetros reológicos (fluencia y mecánicos) y los atributos texturales permitiendo corroborar las relaciones con la estructura del tejido de manzana y pera. Los atributos texturales en todos los tratamientos evaluados fueron mejor explicados por los parámetros de fluencia.

5.4. Conclusiones generales

- Los cambios en las propiedades reológicas y los atributos sensoriales fueron más grandes en los tratamientos volumétricos que en los tratamientos superficiales, como era de esperarse.
- En los distintos tratamientos, el análisis de regresión lineal de cuadrados mínimos parciales (PLS) indicó una correlación negativa entre J_0, J_1 y J_2 y la crujencia, jugosidad y/o dureza sensorial. Pero dependiendo del tipo de tratamiento y la matriz, la correlación no fue tan evidente en otros casos; a veces hubo una correlación positiva entre un dado parámetro mecánico y un atributo sensorial pero la correlación cambió a negativa cuando cambió el tratamiento y la matriz. Por ejemplo, la jugosidad en las manzanas deshidratadas osmóticamente con calcio se asoció positivamente con el parámetro η_N pero la correlación entre jugosidad y η_N fue negativa en las manzanas tratadas con pulsos. En otros casos no fue posible asociar la propiedad sensorial con ningún parámetro reológico.
- Dichas aparentemente inconsistencias confirman que los atributos sensoriales son multifactoriales y los cambios en un elemento estructural del material vegetal las influencian en mayor o menor grado o en tal o cual dirección de acuerdo a la importancia relativa de ese elemento en el atributo específico y al grado de variación en los otros elementos estructurales.
- Los valores sensoriales predichos por los modelos para la dureza y la fracturabilidad en el tejido de manzana fueron más altos que los observados por el panel entrenado atribuyendo dicha diferencia a la geometría utilizada en las muestras. Para el tejido de pera los

valores predichos no fueron representativos con respecto a los valores observados. Por lo tanto, para tejidos muy blandos como la pera, el melón o la sandia, es necesario desarrollar una escala de dureza y fracturabilidad específica para tejidos vegetales (alimentos de alta humedad) que amplíe el rango de valores bajos, para que pueda predecirse por interpolación y no por extrapolación.

- Los resultados sugieren que los parámetros del ensayo de fluencia/recuperación pueden ser exitosos para establecer una correlación sensorial-instrumental. Estos ensayos hasta lo que se conoce nunca habían sido propuestos con tal finalidad.
- Las radicaciones con luz UV-C y pulsos de luz podrían ser tecnologías no térmicas aplicables a productos vegetales mínimamente procesados debido a que los cambios provocados en la estructura de los tejidos no fueron percibidos a nivel sensorial, obteniéndose un tejido procesado similar a un fresco.

6. BIBLIOGRAFÍA

Abbott, J. A.; Watada, A. E. & Massie, D. R. (1976). Effe-gi, Magness-Taylor and Instron fruit pressure testing devices for apples, peaches and nectarines. *Journal of American Society Horticulture Science*, 101, 698-700.

Abbott, J. A.; Watada, A. E. & Massie, D. R. (1984). Sensory and instrument measurement of apple texture. *Journal of American Society Horticulture Science*, 109, 221-228.

Abbott, J. A.; Conway, W. S. & Sams, C. E. (1989). Postharvest calcium infiltration affects textural attributes of apples. *Journal of American Society of Horticulture Science*, 114, 932-936.

Abbott, J. A. & Lu, R. (1996). Anisotropic mechanical properties of apples. *Trans. Am. Soc. Agr. Eg*. 39, 1451-1459.

Abbott, J. A.; Klein, J. D.; Cambell, T. A.; Conwayt, W. S. & Sams, C. E. (2000). Sensory and firmness measurements of calcium and heat treated apples. *Journal of Texture Studies*, 31, 109-121.

Abbott, J. A. & Harper, F. R. (2004). Texture. En: *The commercial storage of fruits, vegetables and florist and nursery stocks.* USDA. ARS. Agriculture Handbook, 66.

Aguilera, J.M. & Stanley, D.W. (1990). *Microstructural Principles of Food Processing & Engineering*. Elsevier Applied Science, Essex, England.

Agustí, M. (2004). *Frutales de pepita*. *Fruticultura*. Ed. Mundi-Prensa.

Aked, J. (2002). Maintaining the post-harvest quality of fruits and vegetables. En: Jongen, W. (ed.), *Fruit and vegetable processing. Improving quality*, Woodhead Publishing Limited and CRC Press, England. Pág. 119-149.

Alandes, L.; Hernando, I.; Quiles, A.; Pérez-Munuera, I. & Lluch, M.A. (2006). Cell wall stability of fresh-cut Fuji apples treated with calcium lactate. *Journal of Food Science*, 71, 615–620.

Alandes, L.; Pérez-Munuera, I.; Llorca, E.; Quiles, A. & Hernando, I. (2009). Use of calcium lactate to improve structure of "Flor de Invierno" fresh-cut pears. *Postharvest Biology and Technology*, 53, 145–151.

Alonso, J.; Rodríguez, T. & Canet, W. (1995). Effect of calcium pre-treatments on the texture of frozen cherries. Role of pectinesterase in the changes in the pectic materials. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 43, 1011-1016.

Alvarez, M. D. & Canet, W. (1998). Rheological characterization of fresh and cooked potato tissues (cv. Monalisa). *Zeitschrift fur Lebensmittel Untersuchung und Forschung*, 207, 55-65.

Alzamora, S.M.; Cerrutti, P.; Guerrero, S. & López-Malo, A. (1995). Minimally processed fruits by combined methods. En: *Food preservation by moisture control: fundamentals and applications*. Eds.: Barbosa-Cánovas G. V., Welti-Chanes J., Lancaster, PA: Technomics Publishing Co. Pág. 463-492.

Alzamora, S. M.; López-Malo, A. & Tapia, M. S. (2000). Overview. En: *Minimally Processed Fruits and Vegetables*, Eds.: Alzamora S.M., Tapia M.S. & López-Malo A., Maryland Aspen Publishers Inc. Pág. 1-9.

Alzamora, S. M. & Salvatori, D. M. (2006). Minimal processing: fundamental and applications*, En: Handbook of Food Science, Technology and Engineering,* Ed.: Y.H. Hui*,* CRC Press / Taylor & Francis, Boca Raton, USA. Pág. 118-1 a 118-16.

Alzamora, S.M., Viollaz, P.E., Martinez, V. Nieto, A.B. & Salvatori, D.M. (2008). Exploring the linear viscoelastic properties structure relationship in processed fruit tissues .En: *Food Engineering: Integrated Approaches,* Eds.: Gutiérrez-López, G. E., Barbosa-Cánovas, G. V., Welti-Chanes J. & Parada-Arias, E., Springer, New York, USA. Cap. 9, Pág. 143-167.

Allende, A. & Artes, F. (2003). UV-C radiation as a novel technique for keeping quality of fresh processed "Lollo Rosso" lettuce. *Food Research International*, 36, 739-746

Anino, S. V.; Salvatori, D. M. & Alzamora, S. M. (2006).Changes in calcium level and mechanical properties of apple tissue due to impregnation with calcium salts. *Food Research International,* 39, 154-164.

Anton, A. A. & Luciano, F. B. (2007). Instrumental texture evaluation of extruded snack foods: a review. *Ciencia y Tecnología Alimentaria* 5(4), 245-251.

ASTM (1968). *Basic Principles of Sensory Evaluation*. Standard Technical Publication 433, American Society for Testing and Materials**:** 110.

Baka, M.; Mercier, J.; Corcuff, R.; Castaigne, C. F. & Arul, J. (1999). Photochemical treatment to improve storability of fresh strawberries*. Journal of Food Science*, 64, 1068–1072.

Baker, R. A. (1993). Firmness of canned grapefruit sections improved with calcium lactate. *Journal of Food Science*. 58(5), 1107-1110.

Barka, E. A.; Kalantari, S.; Makhlouf, J. & Arul, J. (2000). Impact of UV-C irradiation on the cell wall-degrading enzymes during ripening of tomato (Lycopersicon esculentum L.) fruit. *Journal of Agricultural and Food Chemistry,* 48, 667-671.

Barbosa-Cánovas, G. V.; Góngora-Nieto, M. M. & Swanson, B. G. (2000). Processing Fruits and Vegetables by Pulsed Electric Field Technology. En: *Minimally Processed Fruits and Vegetables. Fundamental Aspects and Applications*, Eds.: Alzamora, S.; Tapia, M.; and López-Malo, A., Aspen Publication, Inc. Gasithersburg, Maryland.

Barroca, M.; Guiné, R.; Pinto, A.; Gonçalves, F. & Ferreira, D. (2006). Chemical and microbiological characterization of portuguese varieties of pears. *Institution of Chemical Engineers*, 84, 109-113.

Bialka, K. L. & Demirci, A. (2007). Decontamination of Escherichia coli O157:H7 and Salmonella enterica on blueberries using ozone and pulsed UV-light. *Journal of Food Science*, 72(9), 391– 396.

Bintsis, T.; Litopoulou-Tzanetaki, E. & Robinson, R. (2000). Existing and potential applications of ultraviolet light in the food industry. A critical review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80, 1-9.

Bolin, H. R.; Huxsol, C. C. & Jackson, R. (1983). Effect of osmotic agents and concentration on fruit quality. *Journal of Food Science*. 48:202-205.

Bolton, J.R. (2001). Ultraviolet Application Handbook. J.R. Bolton (ed.) Photosciences Inc, Ayr, Ontario, Canada.

Bongers, A.J. (1992). Comparison of three penetrometers used to evaluate apple firmness. Washington State University. *Journal of Tree Fruit Postharvest*, *3*, 7–9.

Bourne, M.C. (1976). Texture of fruits and vegetables. En: *Rheology and Texture in Food Quality*., Eds.: deMan J.M., Voisly P.W., Rasperr V.F., Stabley D.W., Westport, CT: AVI Publishing Co.

Bourne, M.C. (1978). Texture Profile Analysis. *Food Technology*, 32(7), 62-66.

Bourne, M. C. & Comstock, S. H. (1981). Effect of degree of compression on texture profile parameters. *Journal of Texture Studies*, 12, 201-216.

Bourne, M. C. (1982). Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement.. Academic Press, Orlando, Florida. Pág. 247-262.

Bourne, M. C. (2004). Relation between texture and mastication. *Journal of Texture Studies*, 35, 125-143.

Brandt, M. A.; Skinner, L. Z. & Coleman, J. A. (1963). Texture profile method. *Journal of Food Science*, 28, 404-409.

Calzada, J. F. & Peleg, M. (1978). Mechanical interpretation of compressive stress–strain relationships of solid foods. *Journal of Food Science*, 43, 1087–1092.

Cardello, A.V.; Matas, A. & Sweeney, J. (1982). The standard scales of texture: Rescaling by magnitude estimation. *Journal of Food Science*, 47, 1738-1742.

Carpita, N. & McCann, M. (2000). The cell wall. En: *Biochemistry & Molecular Biology of Plants*, Eds.: Buchanan, B.B.; Gruissem, W.; Jones, R.L, American Society of Plant Physiologists. Rockville, Maryland.

Castelló, M. L.; Igual, M.; Fito, J. P. & Chiralt, A. (2009). Influence of osmotic dehydration on texture, respiration and microbial stability of apple slices (Var. Granny Smith). *Journal of Food Engineering*, 91, 1-9.

Chauvin, M. A.; Ross, C.; Pitts, M.; Kupferman, E. & Swanson, B. (2010). Relationship between instrumental and sensory determination of apple and pear texture. *Journal of Food Quality*, 33, 181–198.

Chauvin, M. A.; Parks, C.; Ross, C. & Swanson, B. G. (2009). Multidimensional representation of the standard scales of food texture. *Journal of Sensory Studies*, 24, 93-110.

Chauvin, M. A.; Younce, F.; Ross, C. & Swanson, B. G. (2008). Standard scales for crispness, crackliness and crunchiness in dry and wet foods: relationship with acoustical determinations. *Journal of Texture Studies*, 39, 345-368.

Cheftel, J. C. & Cheftel H. (1999). Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos. Calidad y caracteres organolépticos de los alimentos. Frutas y legumbres (3ª edición). Editorial Acribia, Zaragoza, España.

Chen, J.; Wang, Z; Wu, J.; Wang, Q. & Hu, X. (2007). Chemical compositional characterization of eight pear cultivars grown in China. *Food Chemi*stry, 104, 268-275.

Chirife, J; Ferro Fontan, C. & Benmergui, E. A. (1980). The prediction of water activity in aqueous solutios in connection with internediate moisture foods. IV. A_w prediction in aqueous non-electrolyte solutions. *Journal of Food Technology*, 15, 59.

Chirife, J. (1982). Principios de la deshidratación osmótica de frutas. Anales de la Asociación Química Argentina 70, 913-932.

Civille, G. V. & Szczesniak, A. S. (1973). Guidelines to training a texture profile panel. *Journal of Texture Studies*, 4, 204-223.

Cosgrove, D. J. (1997). Relaxation in high-stress environment: the molecular bases of extensible cell walls and cell enlargement. *The Plant Cell*, 9, 1031-1041.

Cosgrove, D. J. (2001). Wall structure and wall loosening. A look backwards and forwards. *Plant Physiology*, 125, 131-134.

Costell, E. & Duran, L. (1978). Evaluación y cuantificación de la tixotropía del puré de albaricoque. *Revista Agroquímica y Tecnológica*. 18, 470.

Costell, E.; Fiszman, S. M.; & Durán, L. (1997). Propiedades físicas I. Reología de sólidos y textura. En: *Temas en Tecnología de Alimentos*. Ed.: Aguilera, J.M. CYTED. Programa Iberoamericano de Ciencia Y Tecnología para el desarrollo. Instituto Politécnico Nacional, México

Crowe, K; Bushway, A; Bushway, R; Davis-Dentici, K. & Hazen, R. (2007). A comparison of single oxidants versus advanced oxidation peocesses as chlorine-alternatives for wild blueberry processing (*Vaccinium angustifolium*). *International Journal of Food Microbiology*, 116, 25-31.

Curtis, H. (1985). *Biología*. Editorial Médica Panamericana SAIC. Buenos Aires, Argentina.

De Baerdemaeker, J.G.; and Segerlind, L.J. (1976). Determination of the viscoelastic properties of apple flesh. *Transactions of the ASAE*. 346-353.

D'Ambrogio de Argüeso A, (1986) Manual de Técnicas en Histología Vegetal. Hemisferio Sur S.A., Buenos Aires, Argentina.

Dan, H.; Watanabe, H.; Dan, I. & Kohyama, K. (2004). Effects of textural changes on cooked apples on the human bite, and instrumental tests. *Journal of Texture Studies*, 34, 499-514.

deMan, J.M. (1975). Mechanical properties of foods. En: *Rheology and Texture in Food Quality*. Eds.: De Man, J.M.; Voisey, P.W.; Rasper, V.F.; and Stanley, D.W., Westport, Connecticut. The Avi Publishing Company, Inc.

del Valle, J.; Avánguiz, V. & León, H. (1998). Effects of blanching and calcium infiltration on PPO activity, texture, microstructure and kinetics of osmotic dehydration of apple tissue. *Food Research International.* 31(8), 557-569.

D'hallewin, G.; Schirra, M.; Manueddu, E.; Piga, A. & Ben-Yehoshua, S. (1999). Scoparone and scopaletin accumulation and ultraviolet-C induced resistance to posharvest decay oranges as influenced by harvest date. *Journal of the American Society of Horticultural Science*, 124, 702-707.

D'hallewin, G.; Schirra, M.; Pala, M. & Ben-Yehoshua, S. (2000). Ultraviolet C irradiation at 0.5 kJ/m^2 reduces decay without causing damage or affecting posharvest quality of star ruby grapefruit (C. *paradisi* Macf.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 4571-4575.

Dibble, A. R. G.; Davies, P. J. & Mutschler, M. A. (1988). Polyamine content of long keeping alcobaca tomato fruit. *Plant Physiology*, 86, 338-340.

Di Monaco R.; Cavella S. & Masi, P. (2008). Predicting sensory cohesiveness, hardness and spriginess of solid foods from instrumental measurements. *Journal of Texture Studies*, 39, 129-149.

Dong, X.; Wrolstad, R. E. & Sugar, D. (2000). Extending shelf life of fresh-cut pears. *Journal of Food Science*, 65, 181-186.

Edwards (1999). Vegetables and fruit. En *Food Texture. Measurement and Perception*, Ed.: Rosenthal A.J., An Aspen Publication.

Esau, K. (1982). *Anatomía de las Plantas con Semilla*. Editorial Hemisferio Sur SA, Buenos Aires, Argentina.

Erkan, M.; Wang, C.Y. & Krizek, D.T. (2001). UV-C irradiation reduces microbial populations and deterioration in Cucurbita pepo fruit tissue. *Environmental and Experimental Botany*, 45, 1-9.

Erkan, M.; Wang, S. & Wang, C.Y. (2008). Effect of UV treatment on antioxidant capacity, antioxidant enzyme activity and decay in strawberry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, 48, 163-171.

Fahn A. (1985). *Anatomía Vegetal*. Ediciones Pirámide SA, Madrid, España.

Falik, E.; Aharoni, Y.; Grunberg, S.; Copel, A. & Klein, J. (1994). Postharvest hydrogen peroxide tretament inhibits decay in eggplant and sweet red pepper. *Crop Protection*, 13, 451-454.

Fellows, Peter (1994). Escaldado. En: *Procesado de los Alimentos. Teoría y Práctica*. Editorial Zaragosa Acribia.

Fennema, O.R. (1996). *Química de los Alimentos* (2ª edición). Ed.: Dekker, M. Zaragoza, Acribia.

Ferry, J. D. (1980). *Viscoelastic Properties of Polymers* (3ª edición). Wiley, New York.

Floros, J. D.; Ekanayake, A.; Abide, G. P. & Nelson, P. E. (1992). Optimization of diced tomato calcification process. *Journal of Food Science*, 57, 1144-1148.

Friedman, H. H; Whitney, J. F. & Szczesniak A. S. (1963). The texturometer – A new instrument for objective texture measurement. *Journal of Food Science*. 28: 390-396.

Fonseca, M. J. & Rushing, J. W (2006). Effect of Ultraviolet-C light on quality and microbial population of fresh-cut watermelon. *Postharvest Biology and Technology*, 40, 256-261.

Galeazzi, M. A. & Sgarbieri, V. C. (1978). Banana polyphenoloxidase. Varietal differences and partial characterization. Inst. Congress Food Science Technology Abstract p 237. (Citado por Garcia y Barrett, 2002).

García, J. M.; Herrera, S. & Morilla, A. (1996). Effects of postharvest dips in calcium chloride on strawberry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 44, 30-33.

Garcia, E. & Barrett, D.M. (2002). Preservative treatments for fresh-cut fruits and vegetables. En: *Fresh-cut Fruits and Vegetables*. Ed: Lumikanra, O. CRC PRESS.

Garcia Loredo, A. B. & Guerrero, S. N. (2011). Correlation between instrumental and sensory ratings by evaluation of some texture reference scales. *International Journal of Food Science and Technology*, 46, 1977–1985.

Gerschenson, L. N.; Rojas, A. M. & Marangoni, A. G. (2001). Effects of processing on kiwi fruit dynamic rheological behaviour and tissue structure. *Food Research International*, 34, 1-6.

Gómez, P. L.; Garcia Loredo, A.; Salvatori, D. M.; Guerrero, S. N. & Alzamora, S. M. (2011). Viscoelasticity, texture and ultrastructure of cut apple as affected by sequential anti-browning and ultraviolet-C light treatments. *Journal of Food Engineering,* 107, 214–225.

Gómez, P. (2010). Procesamiento mínimo de manzana: efecto de la radiación uv-c y la luz pulsada de alta intensidad sobre la calidad. Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Gómez, P.; Alzamora, S.; Castro, M. & Salvatori, D. (2010). Effect of ultraviolet-C light dose on quality of cut-apple: Microorganism, color and compression behaviour. *Journal of Food Engineering,* 98, 60-70.

González-Aguilar, G. A.; Wang, C. Y. & Buta, J. C. (2004). UV-C irradiation reduces breakdown and chilling injury of peaches during cold storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture,* 84, 415-422.

González-Aguilar, G. A.; Zavaleta-Gatica, R. & Tiznado-Hernández, M. E. (2007). Improving postharvest quality of mango "Haden" by UV-C treatment. *Postharvest Biology and Technology*, 45, 108-116.

Gray, N. F. (1994). Drinking Water Quality. Problems y Solutions. Ed. N.F. Gray. Wiley, Chichester, USA.

Gómez-López, V. M.; Devlieghere, F.; Bonduelle, V. & Debevere, J. (2005). Factor affecting the inactivation of micro-organisms by intense light pulses. *Journal of Applied Microbiology*, 99, 460-470.

Gómez-López, V.M.; Ragaert, P.; Debevere, J. & Devlieghere, V.M. (2007). Pulsed light for food decontamination: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 18, 464-473.

Gorny, J. R.; Hess-Pierce, B. & Kader, A. A. (1998). Effects of fruits ripeness and storage on the deterioration rate of fresh-cut peaches and nectarine slices. *Postharvest Biology Technology*, 33, 110-113.

Guerrero-Beltrán, J. A. & Barbosa-Cánovas, G. V. (2004). Review: Advantages and limitations on processing foods by UV light. *Food Science and Technology International*, 10, 137-147.

Mittal, J. P.; and Mohsenin, N. N. (1987). Rheological characterization of apple cortex. *Journal of Texture Studies*, 18, 65-93.

Harker, F. R.; Maindonald, J. H. & Jackson, P. J. (1996). Penetrometer measurement of apple and kiwifruit firmness: operator and instrument differences. *Journal of American Society Horticulture Science*, 121, 927-936.

Harker, F. R.; Redgwell, R. J.; Haller, I. C. & Murray, S. H. (1997). Texture of fresh fruit. *Horticulture Review*, 20, 121-224.

Harker, F. R.; Amos, R. L.; Echeverria, G. & Amdgunson, F. A, (2006) Influence of texture on taste: Insights gained during studies of hardness, juiciness, and sweetness of apple fruit. *Journal of Food Science*, 71(2), S77–S82.

Hoornstra, E.; De Jong, G. & Notermans, S. (2002). Preservation of vegetables by light. En: *Frontiers in microbial fermentation and preservation,* Ed: Society for Applied Microbiology, Wageningen, The Netherlands. Pág. 75-77

Hough, G.; Contarini, A. & Muñoz, A. (1994). Training a texture profile panel and constructing standard rating scales in Argentina. *Journal of Texture Studies*, 25, 45-57.

IRAM 200013 (2001). Análisis sensorial. Metodología. Perfil de textura, Instituto Argentino de Normalización.

IRAM 20005-1 (1996). Análisis sensorial. Guía general para la selección y seguimiento de los evaluadores. Parte 1. Evaluadores seleccionados, Instituto de Normalización de Materiales.

IRAM 20005-2 (1996). Análisis sensorial. Guía general para la selección y seguimiento de los evaluadores. Parte 2. Expertos, Instituto de Normalización de Materiales. 20005-2.

Izumi, H. & Watada, A. E. (1994). Calcium treatments affect storage quality of shredded carrots. *Journal of Food Science*, 59, 106-109.

Jackman, R.L. & Stanley, D.W. (1992a). Failure mechanisms of tomato pericarp tissue suggested by large and small deformation test. *Journal of Texture Studies*, 23, 475-489.

Jackman, R.L. & Stanley, D.W. (1992b), Area and perimeter-dependent properties and failure of mature-green and red-ripe tomato pericarp tissue. *Journal of Texture Studies*, 23, 461-474.

Jackman, R.L. & Stanley, D.W. (1995). Creep behaviour of tomato pericarp tissue as influenced by ambient temperature ripening and chilled storage. *Journal of Texture Studies*. 26, 537-552.

Jackman, R.L. & Stanley, D.W. (1995b). Perspectives in the textural evaluation of plant foods. *Trends in Food Science & Technology*, 6, 187-194.

Jellinek G. (1985). *Sensory Evaluation of Food - Theory and Practice.* Chichester, England, Ellis Horwood, Ltd.

Khan, A. A. & Vincent, J. F. V. (1990). Anisotropy of apple parenchyma. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 52, 455-466.

Khan, A. A. & Vincent, J. F. V. (1993a). Compressive stiffness and fracture properties of apple and potato parenchyma. *Journal of Texture Studies*, 24, 423-435.

Khan, A. A. & Vincent, J. F. V. (1993b). Anisotropy in the fracture properties of apple flesh as investigated by crack-opening tests. *Journal of Material Science*, 28, 45-51.

Khan, S.; Royer, J. & Srinivasa, R. (1997). Rheology: Tools and methods. Aviation Fuels with Improved Fire Safety: *A Proceedings*. 6, 31-46

Khin, M. M.; Zhou, W. & Yeo, S. Y. (2007). Mass transfer in the osmotic dehydration of coated apple cubes by using maltodextrin as the coating and their textural properties. *Journal of Food Engineering*, 81, 514-522.

Kim, J. J.; Ben-Yehoshua, S.; Shapiro, B.; Henis, Y. & Camely, S. (1991). Accumulation of scaparone in heat-treated lemon fruit inoculated with *Penicillium digitatum* Sacc. *Plant Physiology*, 97, 880-885.

Klapes, N. & Vesley, D. (1990). Vapor-phase hydrogen peroxide as a surface decontaminant and steriland. *Applied and Environmental Microbiology*, 56, 503-506.

Kleyn, D. (1985). U.S. standards for cheeses. *Dairy Food*, 5, 375-379.

Krotov, E. G.; Pluzhnikov, I. I. & Golubyatnikova, L. A. (1971). Inactivation of enzyme systems in vegetables prior ro freezing. Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Pishch. Tekhnol. 5:42. (Citado por Garcia y Barrett, 2002).

Lagunas-Solar, M. C.; Piña, C.; MacDonald, J. D. & Bolkan, L. (2006). Development of pulsed UV light processes for surface fungal disinfection of fresh fruits. *Journal of Food Protection*, 69 (2), 376–384.

Lamikanra, O. (2002). Enzymatic effects on flavor and texture of fresh-cut. En: *Fresh-cut Fruits and Vegetables*. Ed: Lumikanra, O. CRC PRESS.

Lamikanra, O.; Kueneman, D.; Ukuku, D. & Bett-Garber, K.L. (2005). Effect of processing under ultraviolet light on the shelf life of fresh-cut cantaloupe melon. *Journal of Food Science*, 70, C534-C539.

Lawless H. T. & Heymann H. (2010). *Sensory Evaluation of Food. Principles and Practices*, Springer.

Le Maguer, M. & Yao, Z.-M. (1995). Mass transfer during osmotic dehydration at the cellular level. En: *Food Preservation by Moisture Control. Fundamentals and Applications*. Ed.: Barbosa-Cánovas, G.

Lemoine, M. L.; Civello, P. M.; Martinez, G. A. & Chaves, A. R. (2007). Influence of postharvest UV-C treatment on refrigerated storage of minimally processed brócoli (Brassica oleracea var. Italica). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87, 1132-1139.

Lewicki, P.P. (1998). Effect of pre-drying and rehydration on plant tissue properties: a review. *International Journal of Food Properties*, 1(1), 1-22.

Lewicki, P. & Lukaszuk, A. (2000). Effect of osmotic dewatering on rheological properties of apple subjected to convective drying. *Journal of Food Enginnering*, 45, 119-126.

Lillfort, P. J. (2001). Mechanisms of fracture in foods. *Journal of Texture Studies*, 32, 397-417.

Lin, T. T. & Pitt, R.E. (1986). Rheology of apple and potato tissue as affected by cell turgor pressure. *Journal of Texture Studies*, 17, 291-313

López-Malo, A.; Alzamora, S.M. & Guerrero, S. (2000). Natural antimicrobials from plants. En: *Minimally Processed Fruits and Vegetables. Fundamental Aspects and Applications*. Eds.: Alzamora, S.;Tapia, M and López-Malo, A.. Aspen Publication, Inc. Gasithersburg, Maryland.

Luna-Guzmán, I.; Cantwell, M. & Barrett, D. (1999). Fresh-cut cantaloupe: effects of CaCl2 dips and heat treatments on firmness and metabolic activity. *Postharvest Biology Technology*, 17, 201-213.

Luna-Guzmán, I. & Barrett, D. (2000). Comparison of calcium chloride and calcium lactate effectiveness in maintaining shelf stability and quality of fresh-cut cantaloupes. *Postharvest Biology Technology*, 19, 61-72.

Lyon, C.E.; Lyon, B.G.; Davis, C.E. & Townsend, W.E. (1980). Texture profile analysis of patties made from mixed and flake-cut mechanical deboned poultry meat. *Poultry Science*, 59, 69-76.

Ma, S.; Silva, J.; Hearnsberger, J. & Garner, J. (1992). Prevention of enzymatic darkening in frozen sweet potatoes (Ipomoea batatas (L.) Lam.) by water blanching: Relationship among darkening, phenols, and polyphenol oxidase activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 40: 864-867.

Maharaj, R.; Arul, J. & Nadeau, P. (1999). Effect of photochemical treatment in the preservation of fresh tomato (*Lycopersicon sculentum* cv. Capello) by delaying senescence. *Postharvest Biology and Technology*, 15, 13-23.

Main, G. L.; Morris, J. R. & Wehunt, E. J. (1986). Effect of processing treatments on the firmness and quality characteristics of whole and sliced strawberries after freezing and thermal processing. *Journal of Food Science*, 51, 391-394.

Marquenie, D.; Geeraerd, A. H.; Lammertyn, J.; Soontjens, C.; Van Impe, J.F. & Michielis, C.W (2003). Combination of pulsed white light and UV-C or mild heat treatment to inactivated conidia of *Botrytis cinerea* and *Monilia fructigena*. *International Journal of Food Microbiology*, 85, 185-196

Martens, M. & Martens, H. (1986). Partial least squares regression. En: *Statistical Procedures in Food Research***.** Ed.: Piggot J R, Elsevier Applied Science, London. Pág. 293-359.

Martínez, V. Y. (2005). Alteraciones microestructurales y ultraestructurales de tejidos vegetales mínimamente procesados. Impacto en las características mecánicas. Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Martínez, V. Y.; Nieto, A. B.; Viollaz, P. E. & Alzamora, S. M. (2005). Viscoelatic behaviour of melon tissue as influenced by blanching and osmotic dehydration. *Journal of Food Science*, 70, 12–18.

Martínez V. Y., Nieto A. B., Castro M. A. & Alzamora S. M. (2007). Viscoelastic characteristics of Granny Smith apple during glucose osmotic dehydration. Journal of Food Engineering, 83, 394-403.

Mastrángelo, M. M.; Rojas, A. M.; Castro, M. A.; Gerchenson, L. N. & Alzamora, S. M. (2000). Textural and strucute of glucose infused melon. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80, 769-776.

McFeeters, R. F.; Fleming, H. P. & Thompson, R. L. (1985). Pectinesterase activity, pectin methylation, and texture changes during storage of blanched cucumber slices. *Journal of Food Science*, 50, 201-219.

McFeeters, R. F. & Fleming, H. P. (1991). pH effect on calcium inhibition of softening of cucumber mesocarp tissue. *Journal of Food Science*, 56, 730-735.

Meilgaard, M.; Thomas Carr, B. & Vance Civille, G. Sensory Evaluation Techniques (4ª edición), CRC Press, New York (2006).

Meullenet, J.; Carpenter, J.A.; Lyon, B. G. & Lyon C. E. (1997). Bi-cyclical instrument for assessing texture profile parameters and its relationship to sensory evaluation of texture. *Journal of Texture Studies*, 28, 101-118.

Meullenet, J.; Lyon, B. G.; Carpenter, J. A. & Lyon C. E. (1998). Relationship between sensory and instrumental texture profile atributes. *Journal of Sensory Studies*, 13, 77-93.

Meullenet, J. & Gross, J. (1999). Instrumetnal single and double compression tests to predict sensory texture characteristics of foods. *Journal of Sensory Studies*, 39, 167-180.

Mignani, I.; Greve, L. C.; Ben-Arie, R.; Stotz, H. U.; Li, C.; Shackel, K.; & Labavitch, J. (1995). The effects of GA3 and divalent cations on aspects of pectin metabolism and tissue softening in ripening tomato pericarp. *Physiology Plant*, 93, 108-115.

Mittal, J. P. & Mohsenin, N. N. (1987). Rheological characterization of apple cortex. *Journal of Texture Studies*, 18, 65-93.

Mohsenin, N. N. & Mittal, J. P. (1977). Use of rheological terms and correlation of compatible measurements in food texture research. *Journal of Texture Studies,* 8, 395-408.

Mohsenin, N. N. (1978). Physical Properties of Plant and Animal Materials. Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties. Gordon and Breach Science Publishers. New York - London – Paris.

Morris, J. R.; Sistrunk, W. A.; Sims, C. A.; Main, G. L. & Wehunt, E. J. (1985). Effects of cultivar, postharvest storage, preprocessing dip treatments and style of pack on the processing quality of strawberries. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 110, 172-177.

Mújica-Paz, H.; Valdez-Fragoso, A.; López-Malo, A.; Palou, E. & Welti-Chanes, J. (2003a). Impregnation properties of some fruits at vacuum pressure. *Journal of Food Enginnering*, 56, 307-314.

Mújica-Paz, H.; Valdez-Fragoso, A.; López-Malo, A.; Palou, E. & Welti-Chanes, J. (2003). Impregnation and osmotic dehydration of some fruits: effect of the vacuum pressure and syrup concentration. *Journal of Food Enginnering*, 57, 305-314

Neighbor, N.; Newberry, L.; Bayari, G.; Skeeles, J.; Beasley, J. & McNew, R. (1994). The effect of microaerosolized hydrogen peroxide on bacterial and viral poultry pathogens.*Poultry Science*, 73, 1511-1516.

Ng, A. & Waldron, K. W. (1997). Effect of steaming on cell chemistry of potatoes (*Solanum tuberosum* cv. Bintje) in relation to firmness. *Journal of Agriculture Food Chemistry*. 45, 3411-3418.
Nicolas, J. J.; Richard-Forget, F. C.; Goupy, P. M.; Amiot, M. J. & Aubert, S. Y. (1994). Enzymatic browning reactions in apple and apple products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 34, 109–157.

Ozer, N. P. & Demirci, A. (2006). Inactivation of Escherichia coli O157:H7 and Listeria monocytogenes inoculated on raw salmon fillets by pulsed UV-light treatment. *International Journal of Food Science and Technology*, 41, 354-360.

Padron, M. (1995). Egg dipping in hydrogen peroxide solution to eliminate Salmonella typhimurium from eggshell menbranes. *Avian Disease*, 39, 627-630.

Pan, J.; Vicente, A. R.; Martinez, G. A.; Chaves, A. R. & Civello, P. M. (2004). Combined use of UV-C irradiation and heat treatment to improve postharvest life of strawberry fruit. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84, 1831–1838.

Palou, E.; López-Malo, A.; Barbosa-Cánovas, G.V. & Welti-Chanes J. (2000). High hydrostatic pressure and minimal processing. En: *Minimally Processed Fruits and Vegetables. Fundamental Aspects and Applications*, Eds.: Alzamora, S.;Tapia, M and López-Malo, A., Aspen Publication, Inc. Gasithersburg, Maryland. Pág. 205-222.

Paoletti, F.; Moneta, E.; Bertone, A. & Sinesio, F. (1993). Mechanical properties and sensory evaluation of selected apple cultivars. *Lebensm. Wiss. Technology*, *26*, 264–270.

Peleg, M. (1987). Physical measure of texture. En: *Food Texture*, Ed.: Moskowitz, H. R., Marcell Dekker, Inc., Mew York, NY. Pág: 1-95.

Picchioni, G.A.; Watada, A.E.; Conway, W.S.; Whitaker, B.D. & Sams, C.E. (1995). Phospholipid, galactolipid, and steryl lipid composition of apple fruit cortical tissue following postharvest $CaCl_2$ infiltration. *Phytochemistry*, 39, 763-769.

Pitt, R. E. (1992). Viscoelastic properties of fruit and vegetables. En: *Viscoelastic properties of foods*, Eds.: M.A. Rao and J.F. Steffe, Elsevier Science, Amsterdam. Pág: 3–47.

Pizzocaro, F.; Torreggiani, D. & Gilardi, G. (1993). Inhibition of apple polyfhenoloxidase (PPO) by ascorbic acid, citric acid and sodium chloride. *Journal of Food Processing and Preservation,* 17, 21-30.

Ponting, J.D.; Watters, G.G., Forrey R.R., Jackson, R. & Stanley, W.L. (1966). Osmotic dehydration of fruits. *Food technology*, 125-128.

Ponting, J.D.; Jackson, R. & Watters,G. (1972). Refrigerated apple slices: preservative effects of ascorbic acid, calcium and sulfites. *Journal of Food Science*, 37, 434-436

Poovaiah, B.W. (1986). Role of calcium in prolonging storage life of fruits and vegetables. *Food Technology*, 40, 86-89.

Quiles, A.; Hernando, I.; Pérez-Munuera, I.; Llorca, E.; Larrea, V. & Lluch, M. A. (2004). The effect of calcium and cellular permeabilization on the structure of the parenchyma of osmotic dehydrated Granny Smith apple. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84, 1765-1770.
Quiles, A.; Hernando, I.; Pérez-Munuera, I. & Lluch, M.A. (2007). Effect of calcium propionate on the microstructure and pectin methylesterase activity in the parenchyma of fresh-cut Fuji apples. *Journal of Science Food and Agriculture*, 87, 511–519

Rao, V.N.M. (1992). Classification, description and measurement of viscoelastic properties of solid foods. En: *Viscoelastic Properties of Foods*. Eds.: Rao, M.A.; and Steffe, J.F.. Elsevier Applied Science. London and New York.

Raven, P. H.; Evert, R. F. & Eichhorn, S. E. (1992). *Biología de las Plantas*. 4ta edición . Editorial Reverté S.A., capítulo 20.

Rebouillat, S. & Peleg, M. (1988). Selected physical and mechanical properties of commercial apple cultivars. *Journal of Textures Studies*, 19, 217-230.

Redgwell, R. J.; MacRae, E.; Hallet, I.; Fischer, M.; Perry, J. & Harker, R. (1997). In vivo and in vitro swelling of cell walls during fruit ripening. *Planta*. 203, 162-173.

Resnik, S. L. & Chirife, J. (1988). Proposed theoretical water activity values at various temperatures for selected solutions to be used as reference sources in the range of microbial growth. *Journal of Food Prot.*, 51, 419-423.

Reynolds, E. S. (1963). The use of lead citrate at high pH as an electron-opaque stain for electron microscopy. *Journal of Cell Biology,* 17, 208.

Richard-Forget, F. C.; Goupy, P. M. & Nicolas, J. J. (1992). Cysteine as an inhibitor of enzymatic browning. Kinetic studies. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 40, 2108-2113.

Roa, V. & Tapia de Daza, M.S. (1991). Evaluation of water activity measurements with a dew point electronic humidity meter. *Lebensmittel Wissenchaft und Technologie*. 24: 208-213.

Roberts, P. & Hope, A. (2003). Virus inactivation by hight intensity broad spectrum pulsed light. *Journal of Virological Methods*, 110, 61-65.

Rojas, A.M.; Gerschenson, L.N. & Marangoni, A.G. (2001). Contributions of cellular components to the rheological behaviour of kiwifruit. *Food Research International*. 34, 189-195.

Rosen, J. C. & Kader, A. A. (1989). Postharvest physiology and quality maintenance of sliced pear and strawberry fruits. *Journal of Food Science*, 54, 656-659.

Roudaut G.; Dacremont C.; Vallès Pàmies B.; Colas B. & Le Meste M. (2002). Crispness: a critical review on sensory and material science approaches. *Trends in Food Science & Technology* 13(6-7), 217-227.

Rowan, N.; MacGregor, S. J.; Anderson, J. G.; Fouracre, R. A.; McIlvaney, L. & Farish, O. (1999). Pulsed-light inactivation of food-related microorganisms. *Applied and Environmental Microbiology*, 65, 1312-1315.
Sajnin, C.; Gerschenson, L.N. & Rojas, A.M. (1999). Turgor pressure in vegetable tissues: comparison of the performance of incipient plasmolysis technique using mannitol and polyethylenglycol. *Food Research International*, 32, 531-537.

Salvatori, D. & Alzamora, S. (2000), Structural changes and mass transfer during glucose infusion of apples as affected by blanching and process variables. *Drying technology*, 18, 21-48.

Sams, C. E.; Conway, S. W.; Abbott, J. A.; Lewis, R.J. & Ben-Shalom, N. (1993). Firmness and decay of apples following postharvest pressure infiltration of calcium and heat treatment. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118, 623-627.

Sapers, G. & Sites, J. (2003). Efficacy of 1% hydrogen peroxide wash in decontaminating apples and cantaloupe melons. *Journal of Food Science*, 68, 1793-1797.

Schenk, M.; Guerrero, S. & Alzamora, S., (2008). Response of some microorganisms to ultraviolet treatment on fresh-cut pear. *Food and Bioprocess Technology*, 1, 384-392.

Schenk, M. (2010). Preservación de productos frutales mínimamente procesados mediante la aplicación de luz UV y su combinación con otras tecnologías emergentes. Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Schiffman H. R. (1996). *Sensation and Perception. An Integrated Approach*. New York, John Wiley & Sons.

Schramm Gebhard (1994). A Practical Approach to Rheology and Rheometry (Haake Rheometers). Gebrueder HAAKE Gmbh, Karlsruhe, Federal Republic of Germany.

Shama, G. (1999). Ultraviolet light. En: *Encyclopedia of Food Microbiology*, Eds.: Robinson R.K., Batt, C., Patel, P., Academic Press, London, Pág: 2208-2214.

Sharma, R. R. & Demirci, A. (2003). Inactivation of *Escherichia coli* O157:H7 on inoculated alfalfa seeds with pulsed ultraviolet light and response surface modeling. *Journal of Food Science*, 68, 1448-1453.

Shama, G. & Alderson, P. (2005). UV hormesis in fruits: a concept ripe for commercialisation. *Trends in Food Science and Technology*, 16, 128-136.

Shama, G. (2006). Ultraviolet light. En: *Handbook of Food Science, Technology and Engineering*, Ed.: Hui, Y.H., Boca Raton, Florida:.CRC / Taylor & Francis. Pág: 122-1 – 122-14).

Shama, G. (2007). Process challenges in applying low doses of ultraviolet light to fresh produce for eliciting beneficial hormetic responses. *Postharvest Biology and Technology*, 44, 1–8.

Sherman, P (1970). *Industrial Rheology*. Academic Press.

Shoemaker, C. F.; Lewis, J. I. & Tamura, M. S. (1987). Instrumentation for rheological measurements of food. *Food technology*. March: 80-84.
Singer, S. J & Nicolson, G. L. (1972). The fluid mosaic model of cell membranes. *Science*, 175, 720-731.

Spiazzi, E. A. & Mascheroni, R. H. (2001). Modelo de Deshidratacion Osmótica de Alimentos Vegetales. MAT - Serie A. 4: 23-32.

Stanley, D. W. & Tung, M. A. (1975). Microstructure of food and its relation to texture. En: *Rheology and Texture in Food Quality*, Eds.: De Man, J.M.; Voisey, P.W.; Rasper, V.F.; Stanley, D.W., Westport, Connecticut. The Avi Publishing Company, Inc. Pág. 28-78.

Steffe, J. F. (1996). Rheological methods in food process engineering (2º edición). Freeman Press, USA.

Stevens, C.; Khan, V. A.; Lu, J. Y.; Wilson, C. L.; Pusy, P. L. & Kawake, M. K. (1998). The germicidal and hormetic effects of UV-C light on reducing brown rot disease and yeast microflora of peaches. *Crop Protection*, 17, 75-84.

Summerfelt, S. T. (2003). Ozonation and UV irradiation. An introduction and examples of current applications. *Aquacultural Engineering*, 28, 21-36.

Szczesniak, A. S. (1963). Classification of textural characteristics. *Journal of Food Science*, 28, 385–389.

Szczesniak, A. S.; Brandt, M. A. & Friedman, H. H. (1963). Development of standard ratings scales for mechanical parameters and correlation between the objective and sensory methods of texture evaluation. *Journal of Food Science*, 28, 397-403.

Szczesniak, A. S. & Ilker, R. (1988). The meaning of textural charcteristics - juiciness in plant foodstuffs**.** *Journal of Texture Studies*, 61-78.

Szczesniak, A. S. (2002). Texture is a sensory property. *Food Quality and Preference*, 13, 215-225.

Thakur, B. R.; Singh, R.K.; and Handa, A.K. (1997). Chemistry and uses of pectin - a review. *Food Science and Nutrition*, 37, 47-73.

Thiel, D. L. & Donald, A. M. (2000). Microstructural failure mechanisms in cooked and aged carrots. *Journal of Texture Studies*, 31, 437-455
.
Thybo, A. K. & Martens, M. (1998). Development of a sensory texture profile of cooked potatoes by multivariate data analysis. *Journal of Texture Studies*, 29, 453-468.

Torreggiani, D. (1995). Technological aspects of osmotic dehydration in foods. En: *Food Preservation by Moisture Control: Fundamental and Applications - ISOPOW Practicum II*. Eds.: Barbosa-Cánovas G.V. & Welti-Chanes J.. Technomics Publishing Co., Inc., Lancaster, USA.

Torreggiani, D. & Bertolo, G. (2001). Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. *Journal of Food Enginnering*, 49, 247-253.
Val, J.; Gil, A.; Aznar, Y.; Monge, E. & Blanco, A. (1999). Nutritional study of an apple orchard as endemically affect by bitter pit. *Acta Horticulture*, 513, 493-502.

Van Buren, J. P. (1991). Function of pectin in plant tissue structure and firmness. En: *The Chemistry and Technology of Pectin*. Academic Press, Inc. San Diego, California.

Vincent, J. F. V. (1989). Relationship between density and stiffness of apple fresh. *Journal of Food Science Agriculture*. 47, 443-462.

Vicente, A. R.; Pineda, C.; Lemoine, L.; Civello, P. M.; Martinez, G. A.& Chaves, A. R. (2005). UV-C treatments reduce decay, retain quality and alleviate chilling injury in pepper. *Postharvest Biology and Technology*, 35, 69-78.

Voisey, P. W. (1971). Modernization of texture instrumentation. *Journal of Texture Studies*, 2, 129-195.

Waldron, K. W.; Smith, A. C.; Parr, A. J.; Ng, A. & Parker M. L. (1997). New approaches to understanding and controlling and controlling cell separation in relation to fruit and vegetable texture. *Trends in Food Science & Technology*. 8, 213-221.

Wang, J. & Toledo, R. (1986). Sporicidal properties of mixtures of hydrogen peroxide vapour and hot air. *Food Technology*, 40, 60-67.

Ward, I.M. (1990). *Mechanical Properties of Solid Polymers* (2º edición). John Wiley & Sons. Chichester - New York - Brisbane - Toronto – Singapore.

Whitaker, J.R. (1994). *Principles of Enzymology for the Food Sciences* (2º edición), Marcel Dekker, New York.

Wu, J. & Guo, K. G. (2010). Dynamic viscoelastic behavior and microstructural changes of Korla pear (Pyrus bretschneideri rehd) under varying turgor levels. *Biosystem Engineering*, 106 (4), 485-492.

www.biología.edu.ar/célula vegetal.

www.frutas.consumer.es/documentos/frescas/manzana/intro.

Yuan, S. & Chang, S.K.C. (2006). Relationships between sensory and rheological measurements of texture in maturing commercial cheddar cheese over a range of moisture and pH at the point of manufacture. *Journal of Texture Studies,* 37, 361–382

Zhu, Y.; Pan, Z. & Mchugh, T. (2007). Effect of dipping treatments on color stabilization and texture of apple cubes for infrared dry-blanching process. *Journal of Food Processing and Preservation*, 31, 632-648.

Zuang, R. & Beuchat, L. (1996). Effectiveness of trisodium phosphate for killing Salmonella montevideo on tomatoes. *Letters in Applied Microbiology*, 22, 97-100.