

Influencia del almacenamiento en la textura y viscoelasticidad de bollos de maíz Cariaco blanco

Influence of storage in the texture and viscoelasticity of buns of corn variety white Cariaco

Influência do armazenamento na textura e viscoelasticidade de bollos de milho Cariaco blanco

José David Torres-González,¹ Diofanor Acevedo-Correa,² Piedad Margarita Montero-Castillo³

¹ MSc, Universidad de Córdoba. Estudiante de Doctorado, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile, Chile. jtorresg3@unicartagena.edu.co

² PhD, Universidad del Valle. Docente, Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de Cartagena. Cartagena, Colombia. dacevedoc@unicartagena.edu.co

³ MSc, Universidad del Zulia. Docente, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cartagena. Cartagena, Colombia. pmonteroc@unicartagena.edu.co

Fecha de recepción: 10/03/2016

Fecha de aceptación: 20/05/2016

Para citar: Torres-González JD, Acevedo-Correa D, Montero-Castillo PM. Influencia del almacenamiento en la textura y viscoelasticidad de bollos de maíz Cariaco blanco. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria*. 17(3):403-416

DOI: http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol17_num3_art:516

Resumen

El objetivo fue determinar la influencia del tiempo de almacenamiento en la textura y viscoelasticidad de bollos de maíz Cariaco blanco. Las muestras se almacenaron en refrigeración a 15 °C durante 15 días. Los parámetros texturales se determinaron cada dos días, utilizando un analizador de textura. Las propiedades viscoelásticas se fijaron con una prueba de relajación y compresión del esfuerzo, mediante el ajuste de los datos experimentales al modelo de Maxwell generalizado. Para fijar los parámetros del modelo, se realizó un proceso iterativo por regresión no lineal con las técnicas de mínimos cuadrados amortiguados, mediante el complemento Solver de Excel 2013. El tiempo de almacenamiento influyó en el perfil de textura y en el aumento de la dureza

a partir del día 11, lo cual fue atribuido a la pérdida de humedad del producto durante la refrigeración. La masticabilidad fue más alta a mayor tiempo de almacenamiento. La cohesividad, adhesividad y elasticidad no reportaron diferencias significativas durante el almacenamiento. Se presentaron diferencias en las velocidades de relajación inicial y final expresadas en el modelo. Los datos experimentales se ajustaron satisfactoriamente al modelo ($R^2 > 0,95$) lo cual fue estadísticamente significativo ($p < 0,05$). El comportamiento de los módulos elásticos indicó que los bollos de maíz Cariaco blanco mostraron la tendencia característica de un material viscoelástico, con incremento de su dureza durante el almacenamiento.

Palabras clave: *Zea mays*, aceptabilidad, fibra de la dieta, modelo Maxwell

Abstract

The objective was to determine the influence of storage time on the variation of texture and viscoelasticity of buns of corn of the white Cariaco variety. The samples were stored refrigerated at 15 °C during 15 days. Textural parameters were determined every two days, using a texture analyzer; viscoelastic properties were set by a test of relaxation and compression effort, adjusting the experimental data to the generalized Maxwell model. Also, to determine the model parameters described, an iterative process was performed by non-linear regression using least squares techniques damped by the Solver add-on in Excel 2013. The storage time influenced the texture profile of buns, and the increase of hardness from

the eleventh day, which was attributed to moisture loss of the product during cooling. Chewiness was higher for longer storage time. Cohesiveness, adhesiveness and elasticity reported no significant differences with respect to storage time. Statistical differences were presented at initial and final relaxation speeds expressed in the Maxwell model. The experimental data were successfully fitted to the model ($R^2 > 0.95$) which was statistically significant ($p < 0.05$) and the performance of the elastic module indicated that buns from the white Cariaco variety showed a characteristic behavior of a viscoelastic material, increasing its hardness during the days of storage.

Keywords: *Zea mays*, Acceptability, Dietary fibres, Maxwell's model

Resumo

O objetivo foi determinar a influência do tempo de armazenamento na textura e viscoelasticidade de *bollos de milho Cariaco blanco*. As amostras armazenaram-se em refrigeração a 15 °C durante 15 dias. Os parâmetros texturais determinaram-se cada dois dias, utilizando um analisador de textura. As propriedades viscoelásticas fixaram-se com um teste de relaxação e compressão do esforço, mediante o ajuste dos dados experimentais ao modelo de Maxwell generalizado. Para fixar os parâmetros do modelo, realizou-se um processo iterativo por regressão não linear com as técnicas de mínimos quadrados amortecidos, mediante o complemento Solver de Excel 2013. O tempo de armazenamento influenciou no perfil de textura e no aumento da dureza

a partir do dia 11, o qual foi atribuído à perda de humidade do produto durante a refrigeração. A masticabilidade foi mais alta a maior tempo de armazenamento. A coesividade, adesividade e elasticidade não reportaram diferenças significativas durante o armazenamento. Apresentaram-se diferenças nas velocidades de relaxação inicial e final expressadas no modelo. Os dados experimentais ajustaram-se satisfatoriamente ao modelo ($R^2 > 0,95$) o qual foi estatisticamente significativo ($p < 0,05$). O comportamento dos módulos elásticos indicou que os *bollos de milho Cariaco blanco* mostraram a tendência característica de um material viscoelástico, com incremento da sua dureza durante o armazenamento.

Palavras chave: *Zea mays*, aceitabilidade, fibra da dieta, modelo Maxwell

Introducción

Los bollos son alimentos de origen indígena, elaborados a base de masa de maíz (*Zea mays*), envueltos en hojas de mazorca y cocinados a fuego de leña; están profundamente arraigados y son típicos en la gastronomía de la región Caribe colombiana (Torres et al. 2015a). Normalmente son comercializados de manera artesanal, pero debido a la demanda del consumidor en los últimos años se están empezando a preparar a escala industrial (Castilla et al. 2011).

La textura es un factor importante en la calidad y aceptabilidad de los alimentos, especialmente los de origen vegetal (Kim et al. 2012; Chen y Opara 2013; Torres et al. 2015b). Incluye un número de sensaciones físicas diferentes, por lo cual es más conveniente utilizar el término *parámetros texturales* (Foegeding et al. 2011; Akwetey y Knipe 2012), que es un grupo de características físicas que dependen de los elementos estructurales del material y se relacionan con la deformación, desintegración y flujo por la aplicación de una fuerza. Los parámetros texturales se miden objetivamente como una función de masa, tiempo y distancia (Paula y Conti-Silva 2014; Lorenzo et al. 2015). De acuerdo con Szczesniak (2002), la textura es el conjunto de los atributos mecánicos, geométricos y de superficie de un producto que es perceptible por medio de receptores mecánicos, táctiles, visuales y auditivos.

El análisis del perfil de textura es un excelente procedimiento instrumental que consiste en someter muestras de un producto a una doble compresión respecto a su altura inicial, en la que se simula el esfuerzo de la mandíbula al morder (Kim et al. 2012), sin llegar a romper la matriz de dicho producto. La magnitud de los parámetros medidos es influenciada por la tasa de deformación, por tanto, para que se pueda obtener información objetiva y confiable, es necesario establecer condiciones estandarizadas (Rosenthal 2010).

La dureza se refiere a la fuerza máxima requerida para comprimir el alimento e indica el grado de frescura de este (Akwetey y Knipe 2012). La cohesividad representa el límite hasta el cual se puede deformar un material antes de romperse (Torres et al. 2015b). La adhesividad es el trabajo requerido para

separar un determinado alimento de una superficie o paladar (Akwetey y Knipe 2012). La elasticidad es la altura que recupera el alimento durante el tiempo que pasa entre el primer ciclo y el segundo ciclo de compresión. La elasticidad mide cuánta estructura original del alimento se ha roto (Rosenthal 2010; Al-Hinai et al. 2013).

La gomosidad se define como la energía requerida para desintegrar un alimento semisólido. Al relacionarla con los demás parámetros texturales, es el producto de la dureza por la cohesividad. Por su parte, la masticabilidad es el trabajo necesario para desintegrar un alimento hasta que este quede listo para ser deglutido (Zhu et al. 2013; Torres et al. 2015b).

Los alimentos presentan un comportamiento viscoelástico, es decir, bajo condiciones de carga durante un tiempo de aplicación, se pueden comportar como un sólido, un líquido y, más frecuentemente, como una combinación de los dos (Larrosa et al. 2015; Kurt et al. 2016). El comportamiento mecánico de los productos biológicos se puede modelar mediante analogías compuestas por resortes y amortiguadores (Salinas y Puppo 2014). En el modelo de Maxwell, el resorte y el amortiguador están conectados en serie. En este modelo, el esfuerzo impuesto es soportado por cada elemento y la deformación es la suma de las deformaciones producidas en cada elemento individual. Esto, sin embargo, no describe completamente el comportamiento de los alimentos, por lo cual se utiliza frecuentemente el modelo de Maxwell generalizado, que está compuesto por una serie de resortes conectados en paralelo, como se observa en la figura 1.

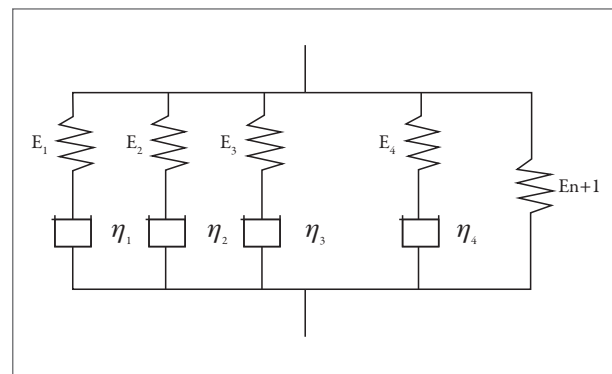


Figura 1. Modelo de Maxwell generalizado. Fuente: Pereira et al. (2013)

En la ecuación 1 se aprecia el modelo matemático de Maxwell generalizado, en el cual se relaciona lo siguiente: $E_{(t)}$ = módulo de elasticidad en el tiempo (Pa), t = tiempo (s), τ_2 = tiempos de relajación (s).

(Ecuación 1)

$$E_{(t)} = E_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + E_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \dots + E_n e^{-\frac{t}{\tau_n}} + E_{n+1}$$

Actualmente no existen investigaciones relacionadas con el perfil de textura y el comportamiento viscoelástico del bollo de maíz blanco. Por tal motivo, el objetivo de esta investigación fue analizar la influencia del tiempo de almacenamiento en la variación de la textura y viscoelasticidad de bollos de maíz de la variedad Cariaco blanco.

Materiales y métodos

Proceso de elaboración del producto y almacenamiento

Se elaboraron bollos de maíz de la variedad Cariaco blanco, siguiendo las técnicas tradicionales (Torrenegra et al. 2013; Torres et al. 2015a). La materia prima se compró previamente seleccionada, según el tamaño del maíz. Se transportó en recipientes adecuados hasta la planta piloto, donde se despojó manualmente de las hojas de la mazorca, las cuales se desinfectaron en una solución de hipoclorito de sodio a 5,0 mg L⁻¹ para su posterior utilización como envoltura de los bollos. Los granos obtenidos se pesaron y se llevaron a un molino semiindustrial, donde fueron transformados en una masa suave (30 kg). Posteriormente, se le adicionaron todos los ingredientes requeridos: cloruro de sodio (10 g/kg de masa) y bicarbonato (5 g/kg de masa), mezclados hasta homogeneizarlos. La cantidad medida de 100 gramos se envolvió en su empaque tradicional (hojas de la mazorca y cabuya), luego los bollos fueron llevados a un recipiente de cocción con agua a una temperatura de 100 °C ± 1. Después, los bollos se sacaron y se colocaron en vasijas con perforaciones de drenaje para facilitar el escurrido.

Finalmente, se almacenaron en bolsas de polietileno de alta densidad, durante 15 días, a una temperatura de refrigeración de 15 °C.

Análisis proximal en muestras de bollos de maíz Cariaco blanco

Se siguió la metodología de la Asociación Oficial de Química Analítica (AOAC 2005). Conforme a esta, la humedad se determinó mediante secado por estufa hasta alcanzar el peso constante (AOAC-934,01); las cenizas, por incineración total a 550 °C (AOAC-942,05); las proteínas totales, por el método Kjeldahl, con un factor N = 6,25 (AOAC-990,03); la grasa, con éter de petróleo como disolvente en un equipo extractor Soxhlet (AOAC-920,39); la fibra dietaria total se midió por el método enzimático-gravimétrico, con amilasas, proteasa y amiloglucosidasa, por sucesivos tratamientos (AOAC-991,43); y los carbohidratos, por diferencia. El valor calórico se calculó de acuerdo con los coeficientes de 4 kcal/g para carbohidratos y proteínas, 2 kcal/g para la fibra dietética y 9 kcal/g para las grasas (Alvis et al. 2008). Todos los ensayos se realizaron por triplicado, con porciones de diez gramos en cada caso.

Análisis de la textura (TPA) y viscoelasticidad de los bollos de maíz Cariaco blanco

Para todos los ensayos, se utilizó un analizador de textura (modelo TA.TX2i Plus, Stable Micro System, acoplado al *software* Texture Expert Exceed, versión 2.64), provisto de una plataforma de aluminio (sobre la cual se colocó la muestra) y un plato de compresión de 75 mm, con una celda de carga de hasta 500 N. La velocidad del cabezal fue determinada mediante ensayos previos y se fijó en 5 mm/s. Después de la cocción, las muestras de bollos de maíz fueron cortadas en piezas de 2,0 cm de alto y 2,0 cm de ancho y sometidas a ensayos de doble compresión uniaxial hasta el 25 % de su altura inicial, con un tiempo de espera de 10 segundos entre las compresiones.

Los parámetros texturales fueron los siguientes: dureza (kg m/s²), adhesividad (kg m/s²), cohesividad,

elasticidad, gomosidad y masticabilidad (kg). Los cuales se calcularon a partir de los datos y gráfico de fuerza por distancia obtenido directamente del *software* del equipo. Los ensayos se llevaron a cabo por triplicado, como lo reportado por Hleap y Velasco (2010), Rosenthal (2010) y Torres et al. (2015a). Así mismo, se determinó la viscoelasticidad de este producto mediante una prueba de relajación al esfuerzo, con una compresión uniaxial de hasta el 25 % de la altura inicial del producto, durante un tiempo de 1.200 segundos. De este modo, se obtuvo la curva de relajación al esfuerzo ajustada al modelo de Maxwell generalizado, como se esquematizó en la ecuación 1. Para determinar los parámetros del modelo descrito ($E1$, $E2$, $E3$, $E4$, $\tau1$, $\tau2$ y $\tau3$), se realizó un proceso iterativo con regresión no lineal, por medio del uso de técnicas de mínimos cuadrados amortiguados, con el complemento Solver de Excel 2013.

Diseño experimental y análisis estadístico

El análisis de laboratorio se llevó a cabo tres veces, con la temperatura ambiente y la humedad ambiente controladas. Los resultados fueron expresados como la media con su respectiva desviación estándar. Se realizó un diseño experimental completamente al azar con un arreglo unifactorial, en el cual se tomó como factor el tiempo de almacenamiento en 8 niveles, con 3 repeticiones, para un total de 24 unidades experimentales. Las pruebas se realizaron cada 2 días durante un periodo de 15 días. Los datos de composición proximal fueron examinados mediante un análisis de varianza, con un nivel de significancia del 5 %.

Para determinar la influencia del tiempo de almacenamiento en los parámetros texturales se realizó un análisis de regresión simple, en el que los datos se ajustaron al modelo cuadrado de la variable independiente. Para los parámetros de viscoelasticidad se desarrolló un modelo no lineal que se ajustó al esquema de Maxwell generalizado, y los datos se procesaron mediante un Anova (análisis de varianza), usando el paquete estadístico comercial Statgraphics Centurion 16.1.15, en un computador personal.

Resultados y discusión

Análisis proximal

En la tabla 1 se muestran los resultados de la composición proximal que se le realizó al producto después del proceso de cocción. Se observó que el contenido de humedad fue mayor en el producto final ($p \leq 0,05$). Esta diferencia se explica por la cantidad de agua que ingresa al alimento durante la cocción por inmersión (Ayadi et al. 2009). Por su parte, el contenido de cenizas fue significativamente menor en los bollos ($p \leq 0,05$), lo que se puede deber a la pérdida de los minerales en el agua de cocción (Markowski et al. 2004). El contenido de grasa de los bollos de maíz fue menor ($p < 0,05$), debido a que durante la elaboración de este tipo de productos se pierde gran parte del germen del maíz, el cual contiene la mayor cantidad de grasa.

Estos resultados coincidieron con los reportados por Jacob y Leelavathi (2007), quienes trabajaron con productos de bajos contenidos en grasa. Ellos señalaron que esta característica resulta de importancia no solo desde el punto de vista de la conservación del producto (por la menor tendencia a la rancidez oxidativa durante el periodo de almacenamiento), sino también para el procesamiento, dado que el bajo contenido de grasa favorece la formación de una textura adecuada en productos de molinería. Estos resultados no coinciden con los presentados por Cori et al. (2004), quienes encontraron valores de grasa del 16,90 % en productos a base de harina de trigo. Por su parte García y Pacheco-Delahaye (2007) encontraron valores de grasa de 0,56 %, evidentemente inferiores a los obtenidos en el presente estudio.

El producto final presentó menores valores de carbohidratos, mientras que en los contenidos de fibra y de proteínas no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$). De esto se infiere que el procesamiento al cual es sometido este producto no afecta la cantidad proteica ni de fibra. Tales resultados fueron inferiores a los obtenidos por Cori et al. (2004) en galletas dulces, quienes reportaron un contenido de proteínas del 9,35 %; mientras que García y Pacheco-Delahaye (2007) obtuvieron un 4,38 % de proteínas, valores que se encuentran por debajo de los registrados en la presente investigación.

Tabla 1. Composición química de los bollos de maíz de la variedad Cariaco blanco, en 100 g de muestra

Parámetros / muestras	Análisis proximal		Análisis de varianza* (Anova)				
	Maíz blanco	Bollos de maíz blanco	Suma de cuadrados	Media cuadrática	CV (%)	Valor F	p-valor
% humedad	18,47 ± 0,22a	24,38 ± 0,24b	73,86	32,93	26,78	74,06	0,00***
% cenizas (BS)	1,51 ± 0,09a	1,47 ± 0,18a	1,99	0,25	23,56	8,07	0,43*
% proteína	7,88 ± 0,34a	7,68 ± 0,79a	0,18	2,04	18,36	20,19	0,83*
% grasa (BS)	10,28 ± 0,41a	7,22 ± 0,74b	17,59	8,79	21,88	22,95	0,00**
% fibra cruda	3,54 ± 0,12a	3,28 ± 0,04a	12,54	1,43	25,07	28,32	0,22*
% carbohidratos	62,85 ± 0,45a	60,29 ± 0,61b	11,93	35,97	9,74	15,52	0,00**
Calorías (Kcal)	358,34 ± 6,16a	345,49 ± 5,14a	9,87	29,82	1,55	17,43	0,33*

* Diferencia no significativa ($p > 0,05$) ** Significativa ($p < 0,05$) *** Altamente significativa ($p < 0,01$)

CV (%) = coeficiente de variación

Fuente: Elaboración propia

Ranalli et al. (2012) y Pereira et al. (2013) señalan que la importancia de las proteínas en los sistemas alimenticios se debe a las propiedades nutricionales, ya que de sus componentes se obtienen moléculas nitrogenadas que permiten conservar la estructura y el crecimiento de quien las consume. Así mismo, como ingredientes de productos alimenticios, las proteínas ayudan a establecer la estructura y las propiedades finales del alimento, debido a sus características funcionales. Puesto que los bollos de maíz blanco estudiados en este trabajo constituyen una fuente de proteínas, estos pueden ser consumidos de manera habitual por quienes requieren tales nutrimentos.

El contenido de fibra dietaria cruda presente en los bollos de maíz de la variedad Cariaco blanco fue similar al reportado para otros productos elaborados con harina de maíz y trigo (Mancebo et al. 2015). Otras investigaciones señalan que la fibra tiene varias implicaciones en la elaboración de los productos derivados de cereales. Por un lado, ejerce influencia sobre la viscosidad y las características de la masa para la textura, pues un mayor contenido de fibra en la harina de los cereales tiende a variar las propiedades reológicas, ya que esta aumenta la absorción de agua

y ayuda a espesar y reducir el volumen de las masas. Así lo evidenciaron Pacheco-Delahaye y Testa (2005), en una formulación de productos con harina de trigo, y también Villarroel et al. (2003), en una formulación de productos de panadería enriquecidos con fibra. Por otro lado, el aporte de fibra puede tener efectos positivos en la salud de los consumidores, por su intervención en los procesos de control del estreñimiento, mejora del control de la glucemia, protección contra el cáncer de colon y menor riesgo de enfermedad cardiovascular (Jacob y Leelavathi 2007).

En un estudio, García y Pacheco-Delahaye (2007) encontraron un porcentaje de fibra dietaria de 3,09%, mientras que Cori et al. (2004) registraron un valor de 3,95% en la fibra dietaria presente en galletas a base de trigo suplementadas con harina de girasol, resultados que fueron similares a los obtenidos en este estudio (3,2%).

Perfil de textura (TPA) de las muestras de bollos de maíz

En la tabla 2 y la figura 2 se esquematiza el análisis de regresión del perfil de textura de los bollos de

maíz Cariaco blanco, el cual arrojó diferencias estadísticamente significativas para la dureza a partir del día 11 de almacenamiento. El aumento de este parámetro que se aprecia en este punto puede deberse a deshidratación del producto por la temperatura de refrigeración. Otra explicación de la variación de la dureza de los bollos de maíz puede estar relacionada con los cambios que se producen

en el almidón con las variaciones de temperatura, principalmente, la gelatinización y la retrogradación, que ocurren, en especial, en dos etapas: una rápida gelación y parcial cristalización de la amilosa (por la formación de segmentos de dobles hélices) y una lenta recristalización de cadenas cortas de amilopectina, que da lugar a un estado más ordenado o cristalino (Milde et al. 2014).

Tabla 2. Análisis de regresión de parámetros de textura de los bollos de maíz Cariaco blanco almacenados en refrigeración a 15 °C, durante 15 días

Parámetros de textura	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P	Coefficiente de correlación Pearson	R-cuadrada
Dureza	1328,99	1439,99	195,68	0,00	0,94	92,89
Cohesividad	0,02	0,03	2,95	0,11	0,34	51,83
Adhesividad	0,01	0,04	2,59	0,12	0,32	50,52
Elasticidad	0,09	0,09	8,30	0,04	-0,54	66,35
Gomosidad	448,85	468,87	38,44	0,00	0,89	83,60
Masticabilidad	340,47	374,86	23,22	0,00	0,71	81,34

Fuente: Elaboración propia

El modelo de regresión ajustado para la variación de la dureza de los bollos de maíz Cariaco blanco respecto a los días de almacenamiento se muestra en la parte (a) de la figura 2. Puesto que el *p-valor* del Anova fue menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables, con un nivel de confianza del 95,0%. Por su parte, el estadístico (R^2) indicó que el modelo ajustado arrojó un 92,89% de la variabilidad en dureza, mientras que el coeficiente de correlación fue 0,94, lo cual indica una relación positiva y altamente significativa entre las variables del modelo.

De manera similar, el modelo ajustado de la figura 2, parte (b), relaciona la cohesividad con los días de almacenamiento. Se encontró que no hubo una relación estadísticamente significativa entre estas variables, lo cual se confirma con el valor del estadístico ($R^2 = 51,83\%$) y el coeficiente de correlación de 0,34. Esto indica una relación relativamente

débil entre las variables. En la parte (c) de la figura 2 se esquematiza el modelo ajustado del análisis de regresión que relaciona la adhesividad con los días de almacenamiento, con un nivel de confianza del 95,0%. En general, no hubo relación significativa entre estas variables, sin embargo, dicho modelo fue el que mejor explicó la variabilidad de la adhesividad, ya que se obtuvo un coeficiente ($R^2 = 50,52\%$). La correlación fue 0,32, lo cual indica una relación débil de asociación entre las variables.

El modelo ajustado entre elasticidad y días de almacenamiento se muestra en la parte (d) de la figura 2. Hubo una relación estadísticamente significativa entre estas variables. Este modelo explica un 66,35% de la variabilidad en elasticidad, con un coeficiente de correlación igual a -0,54, lo cual indica una relación inversa y moderadamente fuerte entre las variables de estudio. Esto quiere decir que, a medida que los días de almacenamiento aumentaron, el

producto se volvió menos elástico, quizá porque las asociaciones estructurales en la matriz del producto, por la refrigeración, se hicieron más rígidas.

Los modelos que explican el comportamiento de la gomosidad y la masticabilidad con respecto a los días de almacenamiento presentan un nivel de confianza del 95,0%. Estos se esquematizan en la parte (e) y (f) de la figura 2. Puesto que para ambos

parámetros se encontró un *p-valor* menor que 0,05, se establece que hubo una relación estadísticamente significativa entre estos parámetros texturales y los días de almacenamiento. El estadístico R^2 y el coeficiente de correlación para la gomosidad fueron de 83,60% y 0,89, mientras que, para la masticabilidad, de 81,34% y 0,72, lo cual demuestra un buen ajuste del modelo a los datos experimentales y una relación significativa entre estas variables.

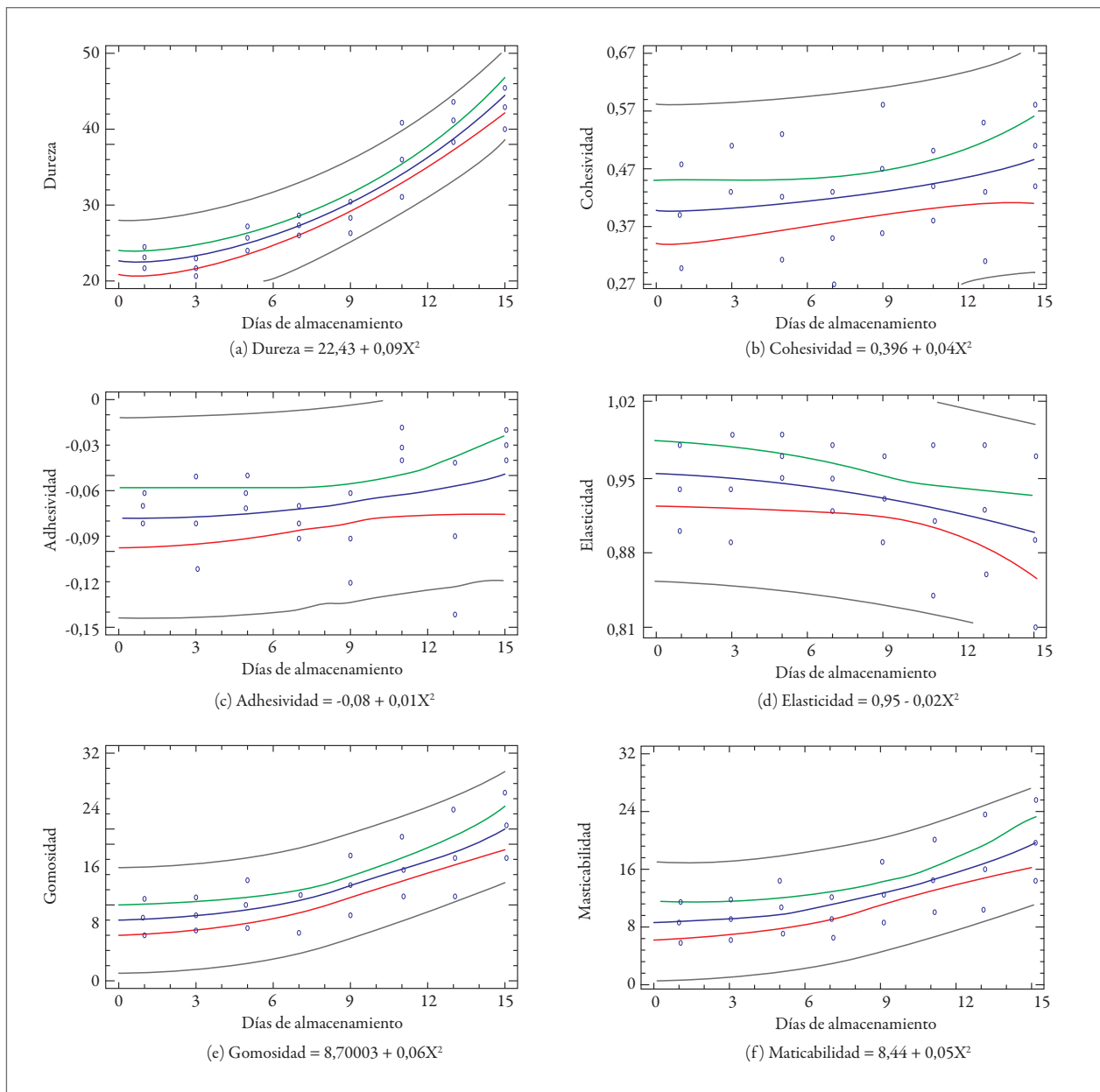


Figura 2. Modelos de regresión ajustados a los datos experimentales de los parámetros de textura de los bollos de maíz Cariaco blanco almacenados en refrigeración a 15 °C, durante 15 días. Dónde: X = Días de almacenamiento. Fuente: Elaboración propia

Se debe considerar que la dureza y la adhesividad pueden estar directamente relacionadas con la capacidad de retención de agua que poseen los alimentos de origen vegetal (Al-Hinai et al. 2013) o con el contenido de almidón (amilosa y amilopectina), debido a que durante el proceso de cocción estos absorben agua lentamente y se hinchan. Zhu et al. (2013) señalan que la relación amilopectina-proteínas puede favorecer las asociaciones moleculares involucradas en la conformación de texturas más duras. Linares et al. (2005), por ejemplo, estudiaron la variación de las propiedades de textura de dos variedades de yuca, durante la cocción por ebullición en diferentes tiempos. Por su parte, Beleia et al. (2006) indicaron que el contenido de almidón es el factor más importante en los cambios de textura durante el tratamiento térmico y el almacenamiento de los productos alimenticios de origen vegetal. Así mismo, Sajeev et al. (2004) asociaron los cambios de textura durante la cocción y el almacenamiento de productos vegetales con la presión interna desarrollada en las células como consecuencia del

hinchamiento del almidón gelatinizado. La mastigabilidad se vio afectada significativamente por el tiempo de almacenamiento ($p \leq 0,05$). Por último, la cohesividad y la adhesividad no reportaron diferencias significativas con respecto al tiempo de almacenamiento ($p > 0,05$).

Prueba de relajación de los bollos de maíz blanco

Se utilizó un modelo de Maxwell generalizado para obtener el comportamiento de relajación de los bollos de maíz Cariaco blanco a través del tiempo de almacenamiento, lo cual se puede observar en las gráficas de la figura 3 (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g) y (h) para los días 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 y 15, respectivamente. El análisis de residuales estadísticos para todos los días de almacenamiento mostró que el modelo Maxwell generalizado de cuatro elementos presentó una distribución normal. Esto indica que los datos experimentales de los bollos de maíz Cariaco blanco evaluados en diferentes días de almacenamiento refrigerado se pueden representar con este modelo.

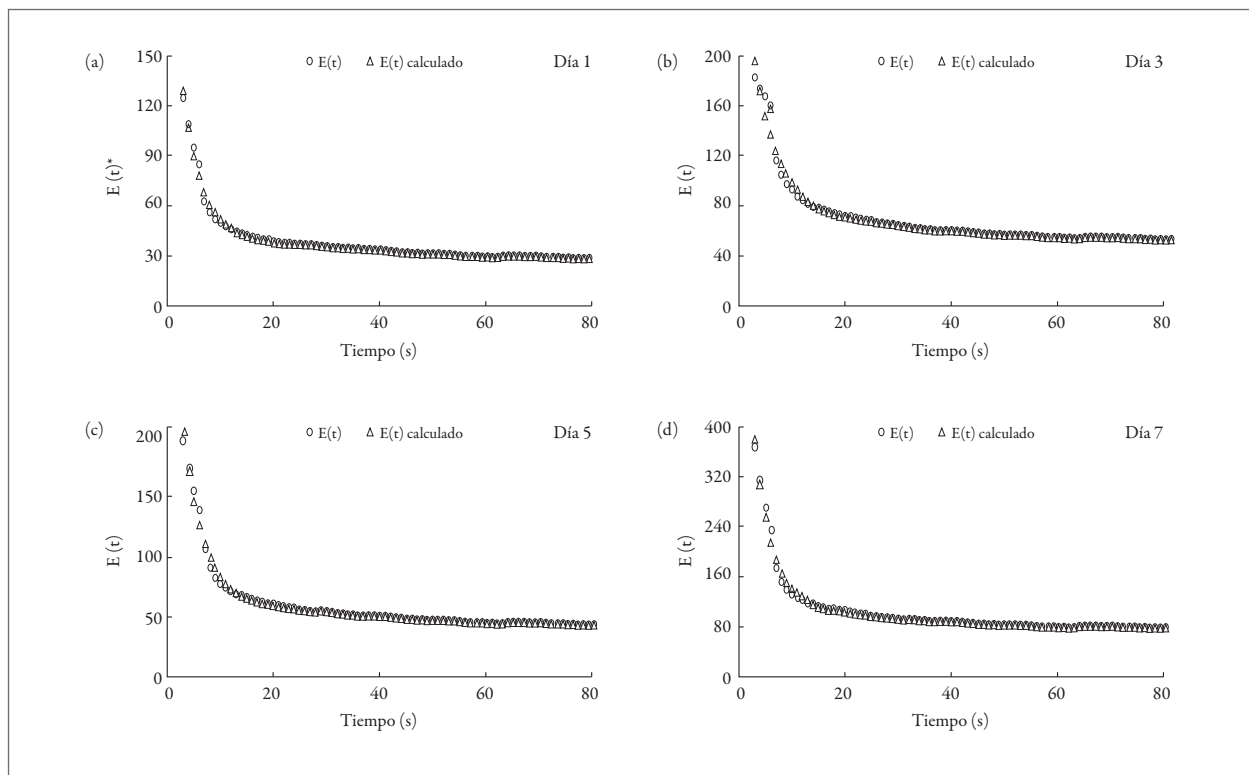


Figura 3. Prueba de relajación de las muestras de bollos de maíz blanco almacenados en refrigeración a 15 °C, durante los días 1 al 15.

Fuente: Elaboración propia

(Continúa)

(Continuación figura 3)

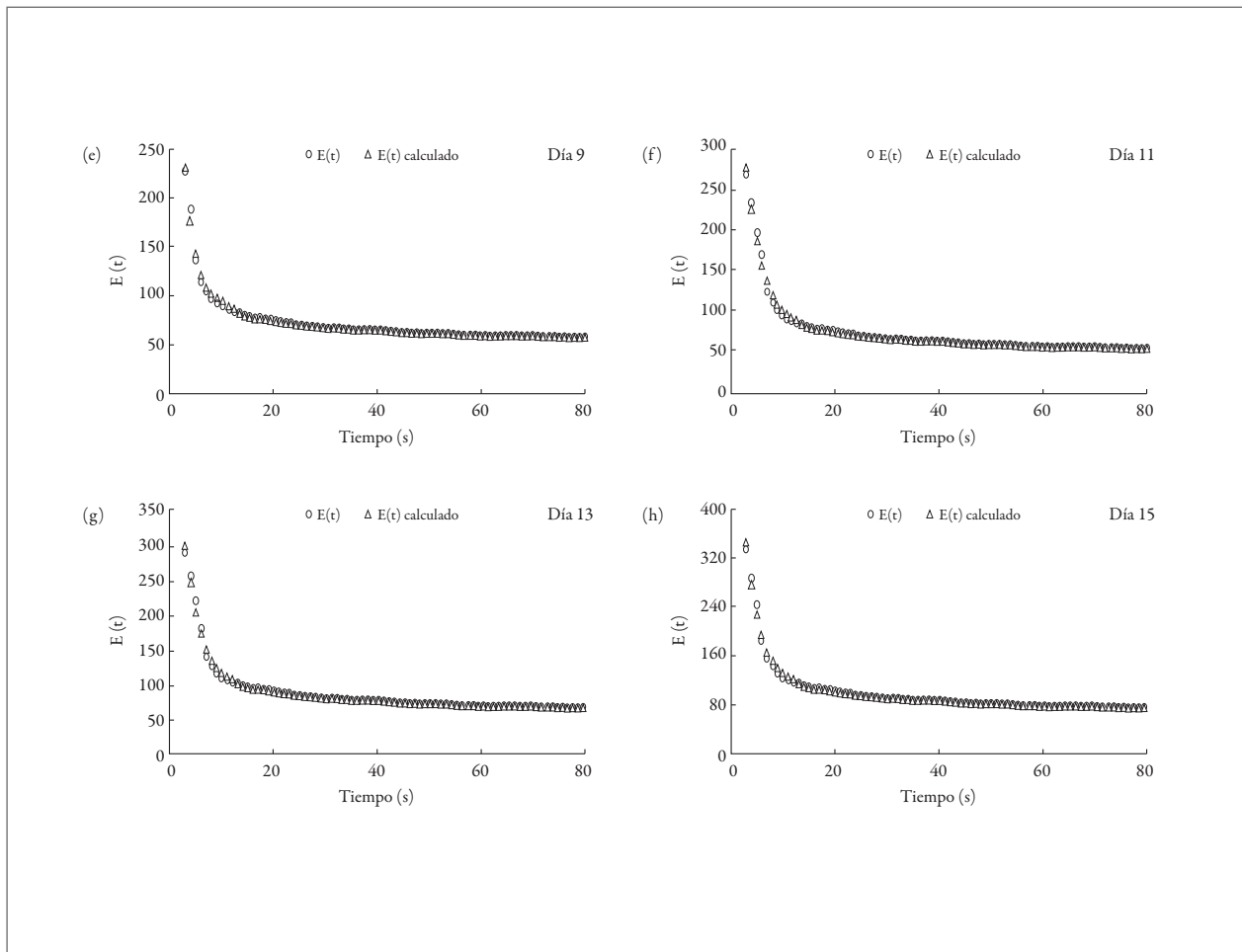


Figura 3. Prueba de relajación de las muestras de bollos de maíz blanco almacenados en refrigeración a 15 °C, durante los días 1 al 15.

Fuente: Elaboración propia

En las curvas de relajación obtenidas mediante los ajustes de los datos al modelo, se encontró que el módulo de elasticidad disminuyó su valor a medida que el tiempo de almacenamiento en refrigeración avanzó, lo cual es característico de un material viscoelástico (Larrosa et al. 2015). También se observó que la resistencia mecánica del producto alcanzó un valor de equilibrio, el cual representa el comportamiento de un material ideal bajo régimen linealmente elástico sin dependencia del tiempo.

En la tabla 3 se muestra una síntesis detallada del comportamiento de las variables de ajustes del modelo

de Maxwell generalizado para la prueba de relajación de los bollos de maíz Cariaco blanco en diferentes días de almacenamiento, con su respectivo coeficiente de determinación múltiple (R^2) del análisis de regresión. Los parámetros correspondientes a los módulos de elasticidad en su mayoría aumentaron a medida que el tiempo de almacenamiento se elevó, lo que indica que los bollos de maíz Cariaco blanco incrementaron su rigidez durante los días en refrigeración. Los tiempos de relajación (τ_1 y τ_2) son los necesarios para que el material disipe esfuerzos. En este caso, tales esfuerzos disminuyeron a medida que aumentó el tiempo de almacenamiento.

Tabla 3. Parámetros de ajustes del modelo de Maxwell generalizado para la prueba de relajación de los bollos de maíz blanco en diferentes días de almacenamiento

Días*	E1 (Pa)	CV (%)	τ_1 (s)	E2 (Pa)	CV (%)	τ_2 (s)	E3 (Pa)	CV (%)	τ_3 (s)	E4 (Pa)	CV (%)	R ²
1	216,33 ± 45,25	20,92	3,98 ± 0,44	85,27 ± 3,87	4,54	0,21 ± 0,04	22,53 ± 2,33	10,34	44,54 ± 2,88	34,55 ± 2,65	7,67	0,98
3	440,38 ± 67,87	15,41	3,94 ± 0,86	95,75 ± 4,29	4,48	0,24 ± 0,03	43,77 ± 12,11	27,67	56,41 ± 11,47	56,48 ± 13,57	24,03	0,97
5	368,13 ± 44,96	12,21	3,66 ± 0,19	96,27 ± 2,67	2,77	0,22 ± 0,02	33,76 ± 2,85	8,44	47,66 ± 2,65	45,22 ± 5,33	11,79	0,96
7	422,87 ± 92,83	21,95	3,38 ± 0,19	96,75 ± 2,98	3,08	0,25 ± 0,05	36,88 ± 14,65	28,88	42,33 ± 2,54	48,69 ± 18,55	25,78	0,99
11	455,39 ± 78,36	17,21	3,35 ± 0,28	98,73 ± 3,55	3,52	0,21 ± 0,06	45,33 ± 2,97	6,55	44,47 ± 6,11	54,12 ± 8,44	15,59	0,95
13	619,33 ± 57,29	9,25	3,27 ± 0,27	98,57 ± 4,36	4,42	0,22 ± 0,04	46,22 ± 4,87	10,54	43,98 ± 4,27	65,77 ± 6,28	9,55	0,98
15	615,08 ± 76,45	12,43	2,48 ± 0,18	98,79 ± 3,86	3,91	0,26 ± 0,07	55,73 ± 4,19	7,52	35,73 ± 2,59	69,33 ± 5,27	7,61	0,96

* CV (%) = coeficiente de variación obtenido del análisis de regresión.

Fuente: Elaboración propia

La velocidad inicial de relajación (rápida) estuvo representada por τ_2 , debido a que tiene valores menores que τ_1 y τ_3 . La velocidad de relajación inicial no varió considerablemente con respecto a los días de almacenamiento de los bollos de maíz Cariaco blanco, debido a que los parámetros E2 y τ_2 no presentaron diferencias estadísticamente significativas a través del tiempo de almacenamiento bajo refrigeración a 15 °C. La velocidad de relajación lenta para los días de almacenamiento fue influenciada por los parámetros τ_1 , τ_3 y E3, debido a que E1 no presentó diferencias significativas con respecto al tiempo de los ensayos ($p > 0,05$). El parámetro E4, que en el modelo representó el valor asintótico de la relajación, aumentó significativamente ($p \leq 0,05$) a partir del día tres de almacenamiento en relación con el primer día, lo cual indica que la elasticidad de los bollos de maíz Cariaco blanco se incrementó significativamente al final del tiempo de almacenamiento.

Estos valores de relajación se pueden explicar por la estructura porosa y multicomposicional que poseen los bollos de maíz Cariaco blanco, factor que hace muy compleja la predicción de su comportamiento viscoelástico a través del tiempo de almacenamiento en refrigeración. Es importante resaltar que la gran mayoría de los materiales viscoelásticos en los que se incluyen los materiales biológicos, como los alimentos, no se relajan con una velocidad uniforme, sino que lo hacen en distintas etapas con tiempos de relajación diferentes (Dzadz et al. 2015; Lorenzo et al. 2015). Cuando una carga constante se aplica a los materiales alimenticios, se pueden observar diferentes comportamientos de relajación y propiedades viscoelásticas. Los materiales elásticos ideales no se relajan, mientras que los viscosos ideales se relajan al instante; los sólidos viscoelásticos se relajan poco a poco hasta llegar a un punto de equilibrio (Tiwari y Bhattacharya 2014). Según Larrosa et al.

(2015), los valores de tiempo de relajación más bajos indican que el material es menos elástico y menos firme.

Los resultados de la presente investigación para bollos de mazorca de la variedad Cariaco blanco fueron similares a los obtenidos por Pereira et al. (2013), quienes estudiaron el comportamiento reológico de la guayaba y encontraron un buen ajuste de los datos de la prueba de relajación con el modelo Maxwell generalizado. Así mismo, Casas-Alencáster y Pardo-García (2005) estudiaron las propiedades de relajación de geles de mezclas de almidón de maíz ceroso entrecruzado-gelana y encontraron que en las pruebas de relajación no se tuvo acceso a la zona de viscoelasticidad lineal; sin embargo, se obtuvo un buen ajuste al modelo Maxwell generalizado, y el empleo de un modelo empírico reveló que los geles exhibieron un comportamiento más próximo al sólido-elástico que los geles de gelana sola. Por su parte, Torres et al. (2012) indicaron que, en el comportamiento reológico de varias frutas, el modelo Maxwell describió mejor el comportamiento viscoelástico de las frutas estudiadas.

Otros autores que han estudiado vegetales señalan que los productos agrícolas con alto contenido de agua muestran un comportamiento mecánico viscoelástico lineal (Ranalli et al. 2012; Salinas y Puppo 2014). Así mismo, Alvis et al. (2009) estudiaron las propiedades mecánicas y viscoelásticas del ñame y encontraron que estas se rigieron fundamentalmente por la composición del producto. En este mismo sentido, Kurt et al. (2016) investigaron el efecto de la goma de tragacanto en las propiedades reológicas y el comportamiento viscoelástico de la estructura interna de un helado, y ajustaron los datos encontrados al modelo Maxwell generalizado: encontraron que la concentración de goma de mascar aumentó las propiedades viscoelásticas del producto.

Dzadz et al. (2015), por su parte, analizaron el efecto de la temperatura sobre el comportamiento viscoelástico de salchichas de carne de pollo y observaron

una mayor deformación en muestras analizadas a temperatura más alta; demostraron que las diferencias en la viscoelasticidad a diferentes temperaturas se pueden atribuir a los cambios inducidos por la temperatura en las propiedades de la grasa. Los resultados de estas investigaciones se relacionan con la presente para bollos de maíz Cariaco blanco, ya que en ellas se aplica el modelo Maxwell generalizado tal como se aplicó en este trabajo.

Conclusiones

El contenido de humedad aumentó en los bollos de maíz blanco después del proceso de cocción, mientras que el contenido de cenizas y carbohidratos disminuyó después del tratamiento térmico. El contenido de proteínas no varió después de la cocción por ebullición. Los análisis de regresión indicaron que el tiempo de almacenamiento influye en el perfil de textura de los bollos de maíz Cariaco blanco, pues se incrementó significativamente la dureza y la masticabilidad ($p < 0,05$). La cohesividad y adhesividad no reportaron diferencias significativas con respecto al tiempo de almacenamiento. Los datos experimentales se ajustaron satisfactoriamente ($R^2 > 0,95$) al modelo Maxwell generalizado de cuatro elementos, y el comportamiento de los módulos elásticos indicó que los bollos de maíz de la variedad Cariaco blanco presentan una respuesta característica de un material viscoelástico, con el aumento de su dureza durante los días en refrigeración.

Descargos de responsabilidad

Este estudio fue financiado durante el año 2015, en el desarrollo de actividades de investigación del Grupo Nutrición, Salud y Calidad Alimentaria, adscrito a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cartagena. El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

Referencias

- Akwetey WY, Knipe CL. 2012. Sensory attributes and texture profile of beef burgers with gari. *Meat Sci.* 92(4):745-748.
- Al-Hinai KZ, Guizani N, Singh V, Rahman MS, Al-Subhi L. 2013. Instrumental texture profile analysis of date-tamarind fruit leather with different types of hydrocolloids. *Food Sci Technol Res.* 19(4):531-538
- Alvis A, Páez M, Lafont J. 2009. Propiedades mecánicas y viscoelásticas del ñame (*Dioscorea alata*). *Inf Tecnol.* 20(5):75-81.
- Alvis A, Vélez CA, Rada-Mendoza M. 2008. Composición de ñames frescos cultivados en Colombia y sometidos a freído por inmersión. *Inf Tecnol.* 19(1):3-10.
- [AOAC] Association of Official Analytical Chemists. 2005. *Official Methods of Analysis of AOAC International.* 17th ed. Maryland, EE. UU AOAC International.
- Ayadi A, Makni I, Artia H. 2009. Thermal diffusivities and influence of cooking time on textural, microbiological and sensory characteristics of turkey meat prepared products. *Food Bioprod Process.* 87(4):327-333.
- Beleia A, Butarelo SS, Silva R. 2006. Modeling of starch gelatinization during cooking of cassava (*Manihot esculenta* Crantz). *LWT-Food Sci Technol.* 39(4):400-405.
- Casas-Alencáster NB, Pardo-García DG. 2005. Análisis de perfil de textura y propiedades de relajación de geles de mezclas almidón de maíz ceroso entrecruzado-gelana. *Rev Mex Ing Quim.* 4(1):107-121.
- Castilla Y, Mercado I, Mendoza V, Monroy M. 2011. Determinación y cuantificación de los niveles de aflatoxinas en bollos de mazorca producidos en Arjona (departamento de Bolívar - Colombia). *Av Investig Ing.* 8(1):69-74.
- Chen L, Opara UL. 2013. Texture measurement approaches in fresh and processed foods-A review. *Food Res Int.* 51(2):823-835.
- Cori M, Pacheco-Delahaye E, Sindoni E. 2004. Efecto de la suplementación de galletas dulces tipo oblea con harina desgrasada de girasol sobre las propiedades fisicoquímicas y sensoriales. *Rev Fac Agron.* 30:109-122
- Dzadz L, Markowski M, Sadowski P, Jakóbczak A, Janulin M. 2015. Creep and recovery characteristics of chicken meat Frankfurters. *J Agr Sci Tech.* 17(4):827-835.
- Foegeding EA, Daubert CR, Drake MA, Essick G, Trulsson M, Vinyard CJ, Van de Velde F. 2011. A comprehensive approach to understanding textural properties of semi-and soft-solid foods. *J Texture Stud.* 42(2):103-129.
- García A, Pacheco-Delahaye E. 2007. Evaluación de galletas dulces tipo wafer a base de harina de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza* B.). *Rev Fac Nal Agr.* 60(2):4195-4212.
- Hleap J, Velasco VA. 2010. Análisis de las propiedades de textura durante el almacenamiento de salchichas elaboradas a partir de tilapia roja (*Oreochromis* spp.). *Biotechnol Sect Agropecuario Agroind.* 8(2):46-56.
- Jacob J, Leelavathi K. 2007. Effect of fat-type on cookie dough and cookie quality. *J Food Eng.* 79(1):299-305.
- Kim E, Corrigan V, Wilson A, Waters IR, Hedderley D, Morgenstern M. 2012. Fundamental fracture properties associated with sensory hardness of brittle solid foods. *J Texture Stud.* 43(1):49-62.
- Kurt A, Cengiz A, Kahyaoglu T. 2016. The effect of gum tragacanth on the rheological properties of salep based ice cream mix. *Carbohydr Polym.* 143:116-123.
- Larrosa V, Lorenzo G, Zaritzky N, Califano A. 2015. Dynamic rheological analysis of gluten-free pasta as affected by composition and cooking time. *J Food Eng.* 160:11-18.
- Linares AR, Vergara ML, Hase SL. 2005. Efecto de la cocción sobre los parámetros texturales de dos variedades de mandioca. *Inf Tecnol.* 16(5):3-9.
- Lorenzo G, Zaritzky N, Califano A. 2015. Mechanical and optical characterization of gelled matrices during storage. *Carbohydr Polym.* 117:825-835.
- Mancebo CM, Picón J, Gómez M. 2015. Effect of flour properties on the quality characteristics of gluten free sugar-snap cookies. *LWT-Food Sci Technol.* 64(1):264-269.
- Markowski M, Bialobrzewski I, Cierach M, Paulo A. 2004. Determination of thermal diffusivity of Lyoner type sausages during water bath cooking and cooling. *J Food Eng.* 65(4):591-598.
- Milde L, Cabral F, Ramírez R. 2014. Efecto del almacenamiento congelado sobre panificado de fécula de mandioca: propiedades físicas, texturales y sensoriales. *Rev Cienc Tecnol.* 16(21):33-39.
- Pacheco-Delahaye E, Testa G. 2005. Evaluación nutricional, física y sensorial de panes de trigo y plátano verde. *Inter-ciencia.* 30(5):300-304.
- Paula AM, Conti-Silva AC. 2014. Texture profile and correlation between sensory and instrumental analyses on extruded snacks. *J Food Eng.* 121:9-14.
- Pereira AP, Souza VR, Teixeira TR, Queiroz F, Borges, SV, Carneiro JD. 2013. Rheological behavior of functional sugar-free guava preserves: effect of the addition of salts. *Food Hydrocoll.* 31(2):404-412.
- Ranalli N, Andrés SC, Califano AN. 2012. Physicochemical and rheological characterization of "dulce de leche". *J Texture Stud.* 43(2):115-123.
- Rosenthal, AJ. 2010. Texture profile analysis - How important are the parameters? *J Texture Stud.* 41(5):672-684.
- Sajeev MS, Manikantan MR, Kingsly ARP, Moorthy SN, Sreekumar J. 2004. Texture analysis of Taro (*Colocasia esculenta* L.) cormels during storage and cooking. *Food Eng Phys Prop.* 69(7):315-321.
- Salinas MV, Puppo MC. 2014. Rheological properties of bread dough formulated with wheat flour-organic calcium salts-FOS-enriched inulin systems. *Food Bioprocess Technol.* 7(6):1618-1628.
- Szczesniak AS. 2002. Texture is a sensory property. *Food Qual Prefer.* 13(4):215-225.
- Tiwari S, Bhattacharya S. 2014. Mango pulp-agar based model gel: textural characterisation. *J Food Sci Technol.* 51(1):75-82.

- Torrenegra ME, Granados C, Acevedo D, Guzmán LE, Álvarez I, Padilla N. 2013. Caracterización del proceso de elaboración del bollo limpio y de mazorca en Villanueva Bolívar-Colombia. Revista Biotecnol Sect Agropecuario Agroind. 11(2):148-155.
- Torres JD, Acevedo D, Tirado DF. 2015a. Análisis de la calidad bromatológica, microbiológica, sensorial y textura de bollo de mazorca cocidos en ebullición. Rev Reciteia. 14(2):7-16.
- Torres JD, González KJ, Acevedo D. 2015b. Análisis del perfil de textura en frutas, productos cárnicos y quesos. Rev Reciteia. 14(2):63-75.
- Torres R, Montes EJ, Pérez O, Andrade R. 2012. Influencia del estado de madurez sobre las propiedades viscoelásticas de frutas tropicales (mango, papaya y plátano). Inf Tecnol. 23(5):115-124.
- Villarroel M, Acevedo C, Yáñez E, Biolley E. 2003. Propiedades funcionales de la fibra el musgo *Sphagnum magellanicum* y su utilización en la formulación de productos de panadería. Arch Latinoam Nutr. 53(4):400-407.
- Zhu B, Li B, Gao Q, Fan J, Gao P, Ma M, Feng X. 2013. Predicting texture of cooked blended rice with pasting. Int J Food Prop. 16(3):485-499.