

# Efecto sobre las propiedades reológicas y panificables de la enzima transglutaminasa en masas con almidón de yuca (*Manihot esculenta*)

## Effect of transglutaminase on the reological and bakery properties of cassava (*Manihot esculenta*) dough

---

Olmedo Hernández<sup>1</sup>, Indira Franco<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias y Tecnología. Universidad Tecnológica de Panamá,  
[hernandezolmedojesus@gmail.com](mailto:hernandezolmedojesus@gmail.com), [Indira.franco@utp.ac.pa](mailto:Indira.franco@utp.ac.pa)

**Resumen**—La yuca (*Manihot esculenta*) es una raíz cultivada ampliamente en las regiones de América Central y el Caribe, y su almidón puede utilizarse en productos de panificación. Se realizó un estudio del efecto de la enzima transglutaminasa microbiana (TG) en masas con harina de trigo, en las que se sustituyó parcialmente ésta con almidón de yuca en un 20%, 40%, 60%, 80% y 100% utilizando diferentes concentraciones de TG sobre la fórmula: 0.01%, 0.02% y 0.03%. El producto fue elaborado siguiendo un proceso semiartesanal de panificación por método directo.

El producto terminado fue sometido a determinaciones fisicoquímicas, como humedad y volumen específico. Se desarrolló además un análisis de perfil de textura (TPA) para medir variables como su fuerza y elasticidad. La humedad de las muestras osciló en un rango conforme de 30% a 32%. El perfil de textura obtenido indica que la enzima no tiene un efecto positivo en la mayoría de las muestras estudiadas, sin embargo, en una concentración de 0.02% y con un 20% de sustitución de la harina mejora algunas de sus propiedades. Bajo estas condiciones de uso de enzima STG-M se mejoró las propiedades estructurales de la miga, siendo conforme la distribución alveolar y fracturabilidad.

La sustitución de harina de trigo por almidón de yuca es viable hasta en un 20% y 0.02% como dosis óptima de TG desde la perspectiva estructural. La fracción alveolar también alcanza un máximo en este punto, efecto beneficioso que se traduce en mayor retención de gas.

**Palabras claves**—almidón de yuca, panificación, perfil de textura, transglutaminasa, yuca (*Manihot esculenta*).

**Abstract**—Cassava (*Manihot esculenta*) is a root widely cultivated at regions of Central America and the Caribbean; its starch can be used in bread products. The aim of this study is determine the effect of the enzyme microbial transglutaminase (TG) in dough with wheat flour partially replaced by cassava starch in 20%, 40%, 60%, 80% and 100 % using different TG concentrations on the formula: 0.01%, 0.02% and 0.03%. A semi-artisanal bread process was done in the manufacturing, monitored by direct method. The finished product was tested and physicochemical determinations were realized, as moisture and specific volume. Texture profile analysis (TPA) was developed to measure variables as strength and elasticity. The humidity of the samples was in a range as 30% to 32%. The texture profile shows there is not an important effect in the samples studied, but in the sample with 0.02% of TGA and with 20% of substitution of the flour, some properties were improved. The use of enzyme STG- M improved structural properties of the crumb, being as the alveolar distribution and fracturability.

The replacement of wheat flour by cassava starch is feasible up to 20% and 0.02% as optimal dose of TG from a structural perspective. The alveoli also reach a maximum at this point; its beneficial effect is an indicator of major gas retention.

**Keyword**—cassava starch, bread baking, texture profile, transglutaminase, cassava (*Manihot esculenta*).

**Tipo de Artículo:** Original

**Fecha de Recepción:** 24 de noviembre de 2015

**Fecha de Aceptación:** 11 de octubre de 2016

## 1. Introducción

El alto contenido de almidón de la yuca y su mayor proporción de amilosa, en comparación con otras fuentes de almidón, hace de este un importante cultivo industrial. El almidón de yuca es la segunda fuente de almidón en el mundo después del maíz, por encima de la papa y el trigo. Es utilizado esencialmente sin modificar, como almidón nativo, pero también se ha modificado con diferentes tratamientos, para mejorar sus propiedades de consistencia, viscosidad, estabilidad a cambios del pH y temperatura, gelificación y dispersión. De esta forma puede emplearse en diferentes aplicaciones industriales que requieren ciertas propiedades particulares. En panificación el almidón de yuca se emplea en la elaboración de productos horneados como pan de bono, pan de yuca y bocadillos tales como «rosquillas» y «besitos». Sin embargo, algunas veces esta adición puede alterar las propiedades panarias de los productos. Este almidón es tradicional en Brasil y Colombia [1]. Panamá es un nicho en donde se puede crear industria para la producción de este almidón, y se ha comprobado que la adición de este almidón abarata los costos de producción de panes [2].

Las enzimas son una herramienta útil en panificación debido a su capacidad para mejorar las propiedades de la masa y la calidad final en el producto. La transglutaminasa microbiana (TG), es una acil transferasa que cataliza reacciones entre residuos de proteínas, introduciendo enlaces covalentes y entrecruzamiento entre las moléculas de proteínas y péptidos, contrario a la mayoría de las enzimas que hidrolizan los sustratos en componentes menores [3].

En el gluten esta enzima induce la formación de polímeros de alto peso molecular y produce modificaciones en la elasticidad y en la fuerza de la masa. El efecto más importante fue observado en medialunas leudadas y en pasteles esponjosos. Otros autores observaron que a medida que se incrementaba la dosis de transglutaminasa disminuía el índice de gluten y todos los parámetros alveográficos. Finalmente, se reportó que el efecto de la enzima depende de la dosis utilizada, bajos niveles de transglutaminasa causan efectos positivos en el pan, mientras que altos niveles disminuyen notoriamente la calidad del pan. Sin embargo, no se conoce bien cuál es el mecanismo por el que la dosis óptima de TG produce una comprobada

mejora en la calidad panadera. A su vez, en la elaboración de masas congeladas, el agregado de estas enzimas podría contrarrestar el daño causado en la red de gluten por el almacenamiento congelado [4, 5].

Es por ello que el objetivo de esta investigación fue estudiar la viabilidad del empleo de almidón de yuca (*Manihot esculenta*) como sustituto en diferentes proporciones de harina de trigo y determinar el efecto sobre la textura de masas de pan tras la adición de enzima transglutaminasa (TG). Para una mejor comprensión del material, el artículo se ha estructurado con una breve introducción, luego la metodología relacionada con la preparación de las muestras y los análisis realizados para conseguir los objetivos planteados, la presentación de los resultados y discusión de los mismos y luego las conclusiones del desarrollo de la investigación.

## 2. Metodología

### 2.1 Preparación de las muestras

Se realizó un estudio del efecto de la TG en masas con harina de trigo, en las que se substituyó parcialmente harina dura de trigo con almidón de yuca. La TG utilizada fue proporcionada por la empresa Ajinomoto, del tipo Activa®STG-M. Se siguió un proceso semiartesanal de elaboración por método directo. Las variables en la investigación se muestran en la tabla 1, y el diseño de la investigación se muestra en la tabla 2. La tabla 3 presenta la formulación y diagrama operacional para la obtención del pan.

### 2.2 Análisis fisicoquímicos

Todos los análisis fueron realizados con tres rebanadas de pan de cada una de las muestras.

#### Propiedad Viscoelástica

Para evaluar la propiedad viscoelástica se utilizó como referencia la tabla 4, que clasifica el producto en función del extensograma de la harina y las características de desarrollo de la masa del pan.

#### Unidades STG-M / g Proteína

Las unidades de enzima transglutaminasa por gramo de proteínas fueron calculadas en base a las unidades contenidas declaradas en la hoja técnica Activa® STG-M y el aporte proteico de las materias primas a la fórmula respectiva según lo indicado en la ficha técnica o la información nutricional de dichos insumos.

**Tabla 1.** Factores en estudio en la investigación

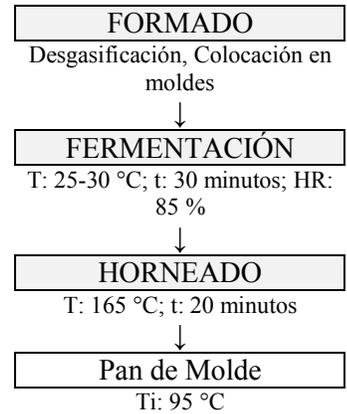
Ingredientes	Contenido (%)	Código de muestra
% Harina de Trigo (A)	100	A1
	80	A2
	60	A3
	40	A4
	20	A5
	0	A6
% Almidón Agrio de Yuca (B)	0	B1
	20	B2
	40	B3
	60	B4
	80	B5
	100	B6
% Enzima STG-M (C)	0.00	C1
	0.01	C2
	0.02	C3
	0.03	C4

**Tabla 2.** Combinaciones entre factores

Harina Trigo (%)	Almidón Yuca (%)	Enzima Transglutaminasa (%)			
		0.00	0.01	0.02	0.03
100	0	A1B1C1	A1B1C2	A1B1C3	A1B1C4
80	20	A2B2C1	A2B2C2	A2B2C3	A2B2C4
60	40	A3B3C1	A3B3C2	A3B3C3	A3B3C4
40	60	A4B4C1	A4B4C2	A4B4C3	A4B4C4
20	80	A5B5C1	A5B5C2	A5B5C3	A5B5C4
0	100	A6B6C1	A6B6C2	A6B6C3	A6B6C4

**Tabla No. 3.** Formulación y diagrama operacional de bloque para el proceso de elaboración del pan

A	Harina de Trigo	<p>→ <b>PESADO</b></p> <p>↓</p> <p><b>MEZCLADO</b> Baja y mediana velocidad: 5 minutos Rápido: 15 minutos</p> <p>↓</p> <p><b>REPOSO</b> T: 25-30 °C; t: 10 minutos</p> <p>↓</p> <p><b>DIVISIÓN Y BOLEADO</b> 6 unidades; 0.450 Kg c/u</p> <p>↓</p> <p><b>REPOSO</b> T: 25-30 °C; t: 30 minutos</p> <p>↓</p>
B	Almidón de Yuca	
C	STG-M	
2.00 %	Levadura	
5.00 %	Azúcar	
1.80 %	Sal	
8.00 %	Mantequilla	
55.00 %	Agua (22°C)	



### Humedad

El estudio de esta variable se realizó utilizando una balanza de humedad marca Precisa®, modelo XM50. La humedad es tomada como la pérdida de peso por secado empleando una balanza de torsión sensible para posar la muestra y una lámpara infrarroja para secar.

### Volumen Específico

El volumen específico del pan fue calculado de acuerdo al método AACC 10-05.01 [6], dividiendo el volumen entre el peso del corte de rebanada de pan. El volumen de la rebanada fue medido por desplazamiento del contenido de semilla de sésamo. El volumen desplazado de las semillas es considerado el volumen de la rebanada de pan. El volumen específico (VE) del pan fue calculado de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$VE = \frac{v}{m} \quad (1)$$

Dónde:

v = Volumen desplazado; [mL]

m = Masa de la fracción de rebanada de pan; [g]

**Tabla 4.** Extensogramas de harinas con diferentes propiedades viscoelásticas relacionadas con las características de panes correspondientes

Extensograma	Desarrollo del pan	Propiedad
A 		Plástica y corta
B 		Rígida y corta

C		Elástica y extensible
D		Extensible
E		Fluida

Fuente: Pizzinato (1997).

### Fracción Alveolar

La estructura de la miga, se puede evaluar a través de medidas del tamaño de alvéolo por medio de análisis de imágenes de la miga de pan. La imagen entera es fragmentada por un valor de gris para crear una imagen binaria. Todos los píxeles con nivel de gris por encima del umbral se muestran en blanco, y por debajo en negro como se observa en la figura 5.

Se ha utilizado el programa ImageJ.lnk (Estados Unidos) como analizador de imágenes para estudiar la estructura de la miga de rebanadas de la región central de cada molde de pan. De ahí se calculó el área negra de la imagen recortada ya convertida a imagen binaria. Esta área corresponde a la fracción alveolar que integra la miga de la rebanada analizada.

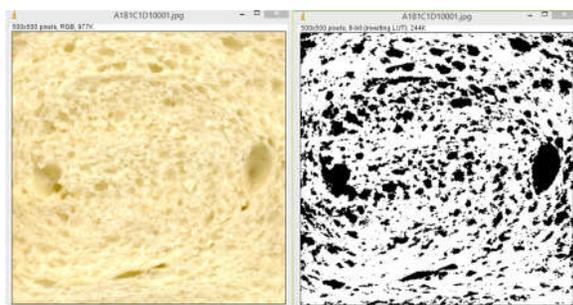


Figura 1. Fotografía de una rebanada de pan. A su lado, imagen binarizada de esta rebanada.

### 2.3 Análisis con microscopía

#### Microscopía de la Miga

Las muestras de pan fueron analizadas mediante microscopía y se pudo observar la distribución alveolar, celdas y túneles en la miga de las rebanadas. Se utilizó un microscopio Konus™ Academy #5304 (Estados Unidos). De cada rebanada de pan se tomó una muestra haciendo un corte transversal de 1 mm y luego se observó en el microscopio con el objetivo 10 x.

### 2.4 Análisis texturales

#### Perfil de Textura

Se empleó un Texturómetro TA. XT plus Texture Analyzer Stable Micro Systems (Reino Unido), calibrado previamente a cada análisis, distancia de sonda: 20 mm, Sonda: P/10.

Se determinaron siete parámetros texturales que derivan de la curva de análisis de textura (figura 2):

- Dureza, la fuerza máxima en el primer ciclo de compresión (H).
- Fracturabilidad, el primer pico significativo en la curva del primer ciclo de compresión (F).
- Cohesividad, la relación entre el área positiva durante el segundo ciclo de compresión y el primero ( $A_4/A_1+A_2$ ).
- Adhesividad, el área negativa del primer ciclo de compresión ( $A_3$ ). Representa el trabajo necesario para retirar el sensor de la muestra.
- Elasticidad, la altura que la muestra recupera entre el término del primer ciclo de compresión y el inicio del segundo (C).
- Gomosidad, el producto de la dureza y cohesividad.
- Masticabilidad, producto de gomosidad y elasticidad.

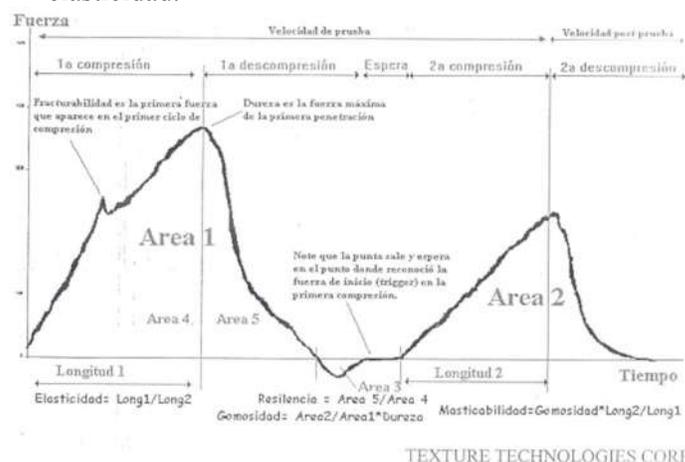


Figura 2. Curva Modelo de Perfil de Textura.

Todas las determinaciones se realizaron por triplicado, y fueron sometidos a pruebas de ANOVA para determinar las diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los valores encontrados, utilizando el *software SPSS 20* (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). La prueba de Tukey se utilizó para establecer las diferencias significativas entre las muestras.

### 3. Resultados y discusión

Se desarrollaron formulaciones en las que se reemplazó parcialmente harina de trigo por almidón de yuca, basadas en pruebas preliminares. Para cada una de estas formulaciones se utilizaron concentraciones de STG-M de 0.01%, 0.02% y 0.03%. De acuerdo a la tabla de clasificación de harinas y masas según su comportamiento y desarrollo viscoelástico desarrollada por Pizzianatto (1997), las masas controles presentan propiedad elástica y extensible hasta una sustitución de harina de trigo por almidón de yuca de 20% [7]. A partir de una sustitución de 40% de la harina, la masa tiene un desarrollo caracterizado por mínimo volumen de desarrollo; la sustitución en un 60% y 80% origina en la masa un desarrollo con propiedad plástica y corta en su estructura, mientras que al emplear como base almidón agrio de yuca al 100 % se obtiene una masa fluida, que al igual a las dos anteriores no presenta calidad panadera.

Cualitativamente la adición de enzima transglutaminasa (TG) causa en la masa patrón (100% harina dura de trigo) la pérdida de elasticidad al ser utilizada en dosis equivalente a 0.03%. En un rango de uso de enzima transglutaminasa STG-M de 0.01% a 0.02% no causa efecto significativo como se presenta en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Determinación cualitativa de la propiedad viscoelástica para las diferentes masas

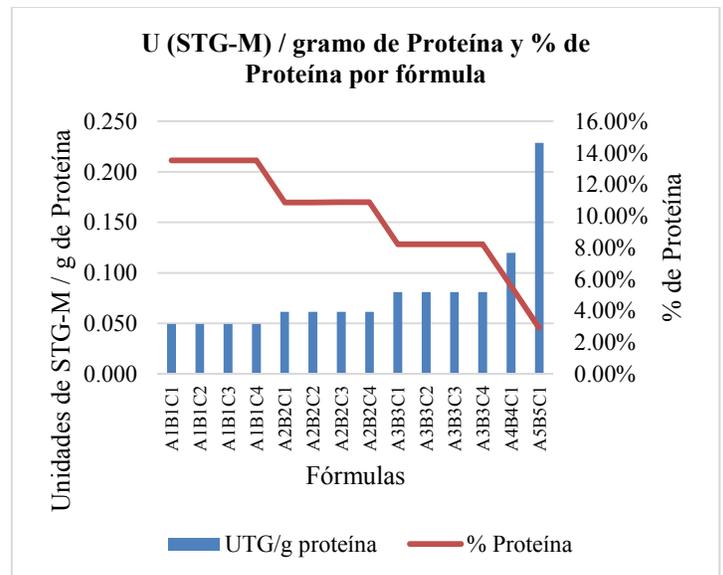
Propiedad Viscoelástica		STG-M (%)			
		0.00	0.01	0.02	0.03
Harina de Trigo (%) : Almidón de Yuca (%)	100:0	 Elástica y extensible	 Elástica y extensible	 Elástica y extensible	 Extensible
	80:20	 Extensible	 Extensible	 Extensible	 Extensible
	60:40	 Rígida y corta	 Rígida y corta	 Rígida y corta	 Rígida y corta
	40:60	 Plástica y corta	x	x	X
	20:80	 Plástica y	x	x	X

		corta			
0:100			x	x	X

x: Ensayo descartado.

### Unidades de Transglutaminasa / Gramo de Proteína

A medida que disminuyó el contenido proteínico por la sustitución parcial de harina de trigo por almidón agrio de yuca aumentó la proporción de Unidades de enzima STG-M por gramo del nutriente, como se puede observar en la figura 3. En un estudio realizado en el que se utilizó harina de soya, harina de arroz, almidón de papa y harina de maíz para crear un pan sin gluten, y tres concentraciones diferentes de la enzima: 0.1, 1.0 y 10 U de STG-M/ g de proteína, se obtuvieron buenos resultados al utilizar entre 0.1 y 1.0 U de STG-M/ g de proteína [6]. Por ello se decidió trabajar en este rango de unidades de STG-M.



**Figura 3.** Valor de unidades de enzima transglutaminasa por gramo de proteína y contenido proteínico teórico según fórmula experimental para las diferentes formulaciones.

### Humedad

El contenido de humedad no varió de manera significativa ( $p < 0.05$ ) entre las diversas formulaciones, manteniéndose en un rango conforme entre 30% y 34%, siendo el valor máximo permitido de 38% para el pan blanco. En un estudio anterior [8] se encontraron diferentes resultados, ya que el uso de TG aumenta el contenido de humedad de los panes comparados con el control. Algunos componentes como la goma guar en

las formulaciones también ayuda a incrementar el contenido de humedad en las mismas [9].

### Volumen Específico

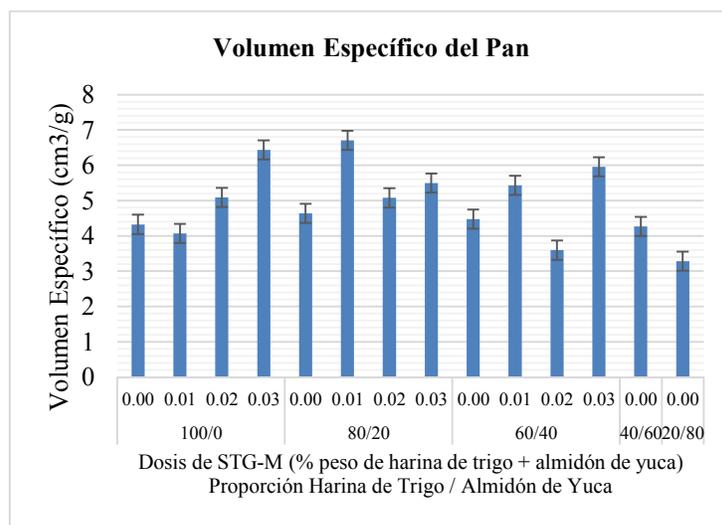
La sustitución de harina de trigo por almidón de yuca se traduce en una disminución del volumen específico del pan a medida que se introduce en la fórmula mayor contenido del almidón de yuca. El volumen específico disminuye hasta en un 24% al hacer una sustitución del 80% de harina de trigo (figura 4), debido a que una harina con alto contenido de gluten presenta abundantes uniones disulfuro intercatenarias, permitiendo obtener un pan con alto volumen. En caso opuesto, si el gluten muestra abundantes grupos sulfhidrilo, no tiene la capacidad de retener el gas, lo que conduce a un bajo volumen. La altura en las rebanadas puede observarse en la tabla 6.

Los resultados para el análisis del volumen específico del pan sugieren que resulta viable hacer una sustitución hasta un 20% de harina de trigo. Lo anterior coincide con lo reportado por otros grupos de investigación [10] donde concluyen que la sustitución de harina de trigo por harina de yuca hasta un límite de 30% no afecta el volumen y la estructura del producto.

**Tabla 6.** Altura indicativa del volumen desarrollado por la estructura de las muestras de pan analizadas

		STG-M (%)			
		0.00	0.01	0.02	0.03
Harina de Trigo (%) : Almidón de Yuca (%)	100:0				
	80:20				
	60:40				
	40:60		-	-	-
	20:80		-	-	-

El uso de la TG como mejorador de volumen es notorio, ya que se da un incremento de un 48.7% al usar dosis de 0.03% de STG-M sobre base de harina de trigo. Para las masas con sustitución equivalente a 20% de almidón agrio de yuca, el volumen específico alcanza un máximo al utilizar sobre base de harina 0.01% de STG-M. Sin embargo, resultados contrarios donde no se mostró una mejora significativa ( $p < 0.05$ ) al añadir TG en una masa que contenía almidón de yuca pregelatinizado y harina de yuca fue publicado [11]. TG puede causar disminuciones en el volumen del pan, particularmente cuando se usa en altas concentraciones por medio de catalizar la formación de una red de proteína que no ocurriría en la ausencia de la enzima [12].



**Figura 4.** Valores del volumen específico del pan para cada una de las formulaciones y condiciones propuestas.

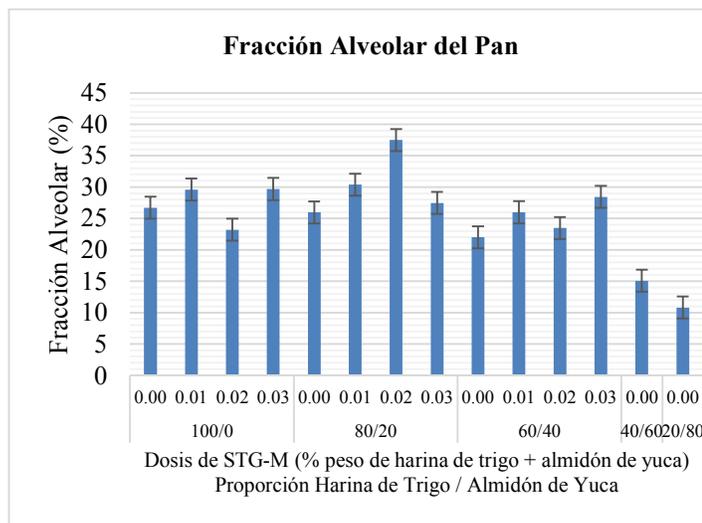
### Fracción Alveolar

El efecto positivo de la enzima TG en la fracción alveolar presente en la miga del pan se observó mayormente al ser utilizada en una concentración de 0.02% STG-M sobre peso de harina de trigo y una sustitución por almidón de yuca de 20%, al alcanzar el registro más alto en cuanto a la fracción de alveolos y que físicamente es aceptable o considerado conforme. En este punto la fracción alveolar aumenta con respecto al control un 40%, y como se ha mencionado anteriormente, se trata de una miga propia del tipo de pan desarrollado: cerrada, con paredes delgadas y celdas uniformes. El carácter de la miga se puede observar en la tabla 7.

Es notoria la disminución en la fracción alveolar media de las rebanadas de pan conforme al incremento en la sustitución por almidón de yuca. La fracción alveolar disminuye como se observa en la Tabla 7 en un 2.77% al sustituir 20% del almidón de trigo y 59.55% al sustituir el 80% de la harina de trigo duro inicialmente empleada. Esta disminución en la fracción alveolar es indicadora de una menor retención de gas carbónico.

**Tabla 7.** Distribución alveolar analizada mediante la conversión a imagen binaria de rebanadas escaneadas para cada una de las formulaciones y condiciones propuestas

Distribución alveolar		STG-M (%)			
		0.00	0.01	0.02	0.03
Harina de Trigo (%) : Almidón de Yuca (%)	100:0				
	80:20				
	60:40				
	40:60		-	-	-
	20:80		-	-	-



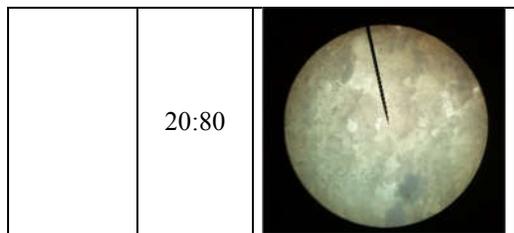
**Figura 5.** Valores para la fracción alveolar del pan para cada una de las formulaciones y condiciones propuestas.

### Microscopía de Miga

La microestructura del pan se ilustra en las figuras presentadas en la tabla 8. Se encuentra una disminución en el tamaño de las celdas de la miga a medida que se incrementa la sustitución de harina de trigo, se hace más cohesiva su estructura y por ende es más cerrada dicha miga. Esta cohesividad otorga además mayor densidad y un volumen específico que disminuye a medida que aumenta la sustitución de harina de trigo por almidón agrio de yuca. Esto se encuentra relacionado directamente con el aumento de dureza al incrementar la concentración de STG-M en las muestras.

**Tabla 8.** Microscopías de miga de muestras con sustitución parcial de harina de trigo por almidón de yuca.

Microscopía 10x		STG-M (%)	
		0.00	
Harina de Trigo (%) : Almidón de Yuca (%)	100:00		
	80:20		
	60:40		
	40:60		

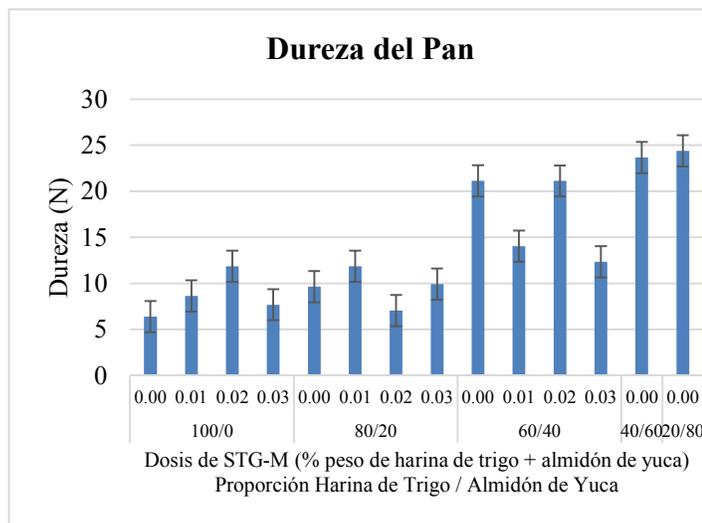


**Perfil de Textura**

La textura puede ser considerada una manifestación de las propiedades reológicas de los alimentos, y constituye un atributo de calidad imprescindible, ya que de ello depende la aceptabilidad del producto de panificación [13].

**Dureza**

No existe diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) en los valores de dureza en la miga del pan cuando se adicionó una concentración de enzima de 0.03% y se utilizó un 20% de harina de yuca en la formulación, como puede observarse en la figura 6. Sin embargo, la enzima parece no tener efecto en la dureza cuando se añadió a menores concentraciones, ya que los valores de la misma aumentan hasta un 270% comparando con el control y sustituyendo la harina de trigo con un 60% de almidón agrio de yuca. El incremento en la dureza de la miga se ha estudiado en trigo [14] y en panes sin gluten [8], encontrándose un comportamiento similar.

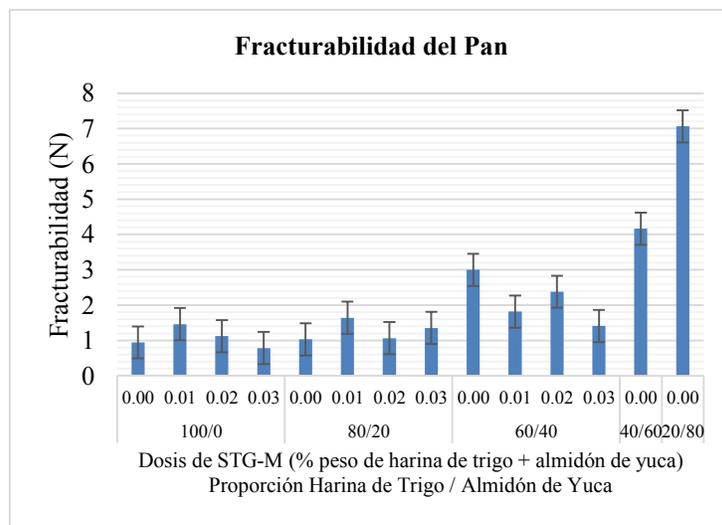


**Figura 6.** Factores de dureza del pan para cada una de las formulaciones y condiciones propuestas.

**Fracturabilidad**

La fracturabilidad es una propiedad que está muy ligada a la dureza del pan, puesto que entre mayor es la dureza de la miga, más quebradiza y fracturable será.

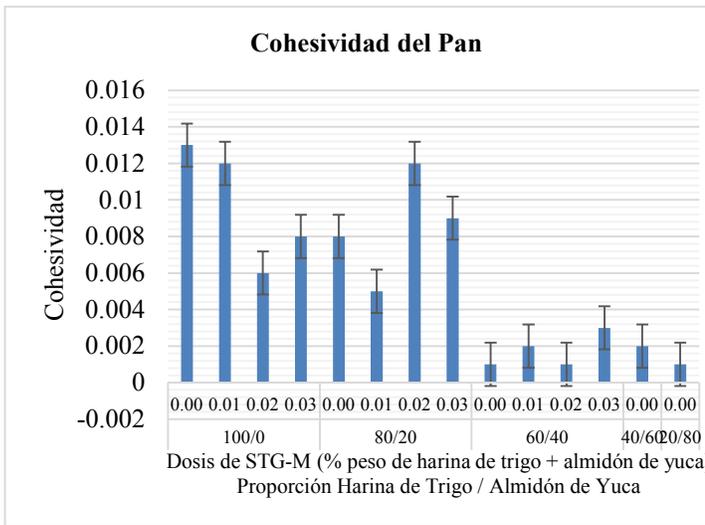
Los diferentes valores para la fracturabilidad se pueden apreciar en la figura 7. No existe diferencia significativa en los valores de fracturabilidad ( $p < 0.05$ ) al utilizar diferentes dosis de enzima TG, cuando se utiliza un 20% de harina de almidón de yuca en la formulación. Por otra parte, hay un aumento en los valores de fracturabilidad cuando se incrementó el porcentaje de almidón de yuca a un 40% y 60%, que es mucho más notorio en los controles. Cuando se utilizó una dosis de 0.01% de STG-M, los valores de fracturabilidad son mayores, alrededor de 1.5 N, ya que estos valores se mantienen alrededor de 1 N cuando se añade 0.02% de STG-M en la formulación control y al utilizar 20% de almidón de yuca.



**Figura 7.** Valores de fracturabilidad del pan para cada una de las formulaciones y condiciones propuestas.

**Cohesividad**

Se presenta en la figura 8 los resultados para los valores de cohesividad en las diferentes muestras. Se observa una disminución en la fuerza con la que están unidas las partículas conforme aumenta la sustitución de harina de trigo por almidón de yuca. Esta disminución viene dada por enlaces y uniones de menor fuerza entre el almidón de yuca y la red de gluten formada por la harina de trigo. Esta disminución es más notoria cuando se incrementa en más de un 40% el contenido de almidón de yuca en la formulación panadera. La disminución de la cohesividad con el aumento de la cantidad de almidón de yuca tiene una relación directa con el aumento de la fracturabilidad de las muestras.

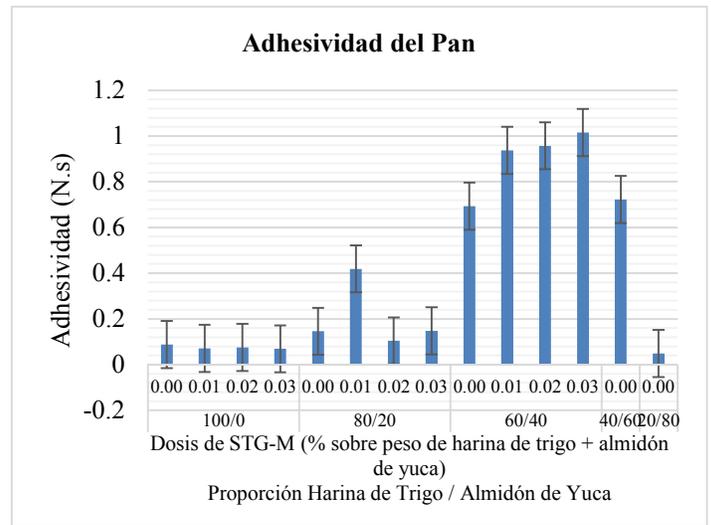


**Figura 8.** Valores de cohesividad del pan para cada una de las formulaciones y condiciones propuestas.

### Adhesividad

Se refiere al trabajo necesario para despegar las muestras del pan de determinada superficie. Se encuentra que esta se incrementa conforme aumenta la sustitución parcial de harina de trigo (figura 9), a medida que mayormente la red de gluten integra almidón de yuca, la adhesividad de las muestras de producto terminado aumenta hasta un 720.45% de la adhesividad inicial. Este es el mismo comportamiento que se dará en la superficie del paladar.

La adición de transglutaminasa STG-M contribuye al incremento de la adhesividad característica de la miga de pan. En este caso los valores mayores, como lo indica la figura No. 10, se alcanzaron al utilizar dosis de STG-M por encima del 0.02% especialmente al sustituir del 40% al 60% de harina de trigo por almidón de yuca. La característica de una elevada cohesividad es muy deseable en el pan, porque se puede formar un bolo, más que desintegrarse durante la masticación [8].

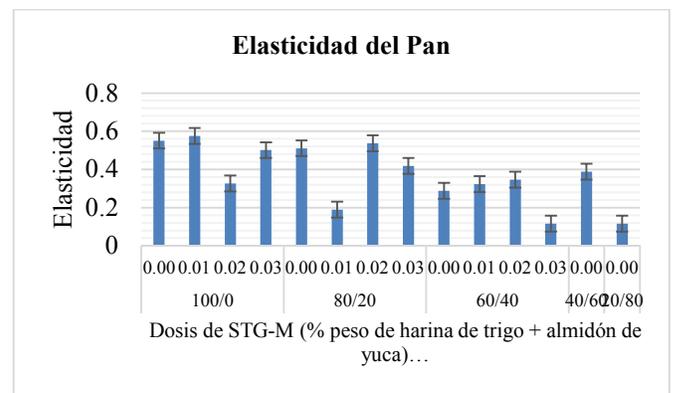


**Figura 9.** Resumen de resultados, adhesividad del pan.

### Elasticidad

Los resultados para la elasticidad de las muestras como atributo de textura según el análisis de perfil de textura realizado se muestran en la figura 10, donde es notoria la disminución de los valores de elasticidad al reducir la proporción de harina de trigo en la formulación. Si bien estas masas mantuvieron un comportamiento reológico con calidad panadera (elástica y extensible) hasta un nivel de sustitución de harina de trigo de 40%, la elasticidad promedio de las muestras analizadas disminuyó en este punto en un 41.58%.

Un máximo en la elasticidad se alcanza al utilizar dosis de STG-M al 0.02% sobre peso total de harina de trigo y almidón de yuca. Lo anterior fue medido al realizar sustitución parcial de 20% y 40%.



**Figura 10.** Valores de elasticidad del pan para cada una de las formulaciones y condiciones propuestas.

### Gomosidad

La gomosidad se refiere a la energía requerida para desintegrar las muestras de pan antes de ser tragadas. En la figura 11 se ilustra una disminución en la gomosidad al reducir las partes de harina de trigo en las formulaciones analizadas. Esta disminución en la gomosidad de la miga resultante es característica del almidón de mandioca o yuca.

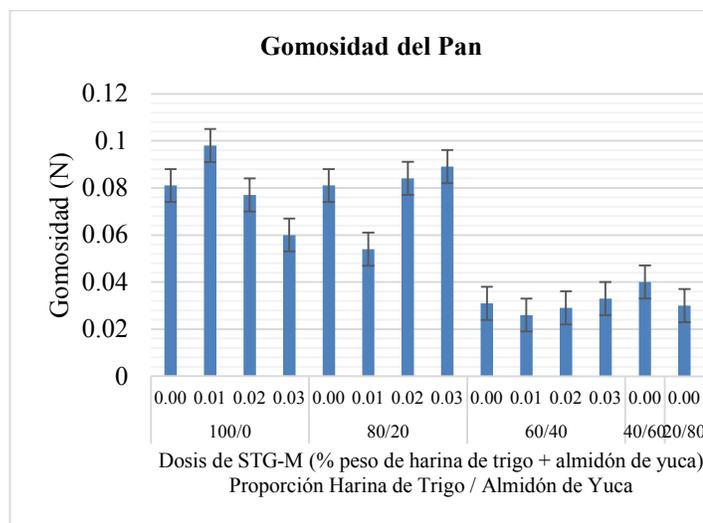


Figura 11. Resumen de resultados, gomosidad del pan.

### Masticabilidad

Los datos obtenidos de masticabilidad a través del análisis de perfil de textura realizado representan el trabajo necesario para desintegrar las muestras de pan hasta que está listo para ser deglutido. Dicha masticabilidad disminuye en términos promedio de un 86.57% en las muestras con 0.00% de STG-M y almacenamiento congelado de 0 días al realizar sustitución de 40% de harina de trigo. A partir de ese punto se incrementa hasta un 58.70% de la masticabilidad de la muestra patrón. Estos resultados se pueden apreciar en la figura 12.

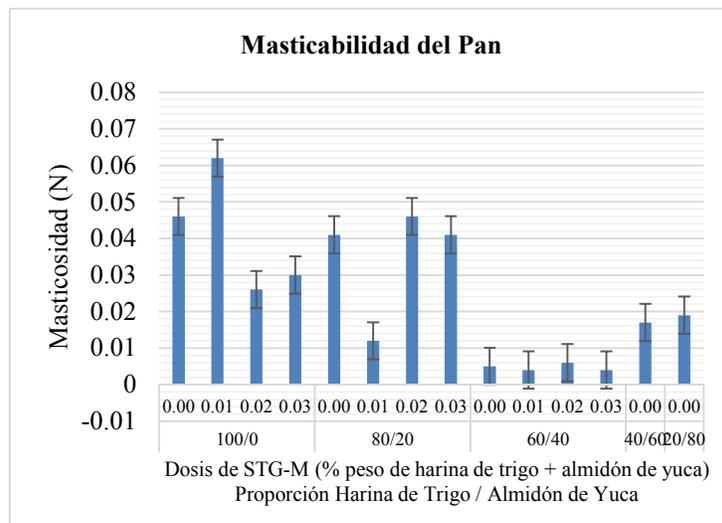


Figura 12. Resumen de resultados, masticabilidad del pan.

### Resiliencia

Los datos obtenidos de la energía de deformación que las muestras pueden recuperar luego de su primera deformación entendida técnicamente como resiliencia, no logran establecer una tendencia significativa ( $p < 0.05$ ) en cuanto al efecto de la sustitución parcial de harina de trigo por almidón de yuca y el empleo de distintas dosis de enzima transglutaminasa STG-M.

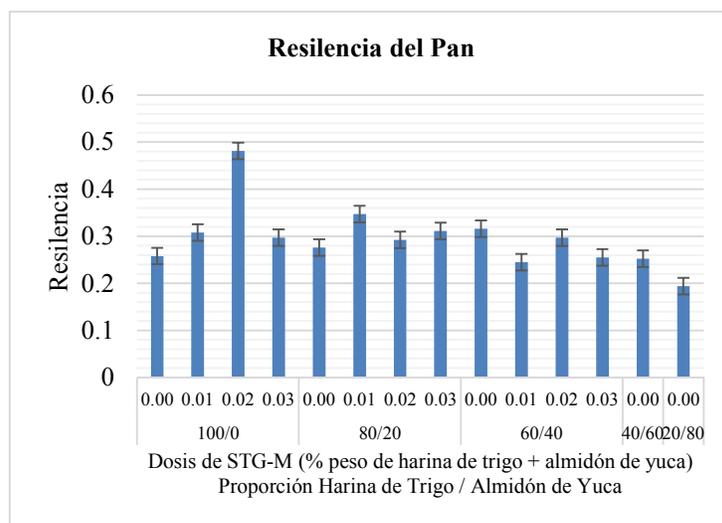
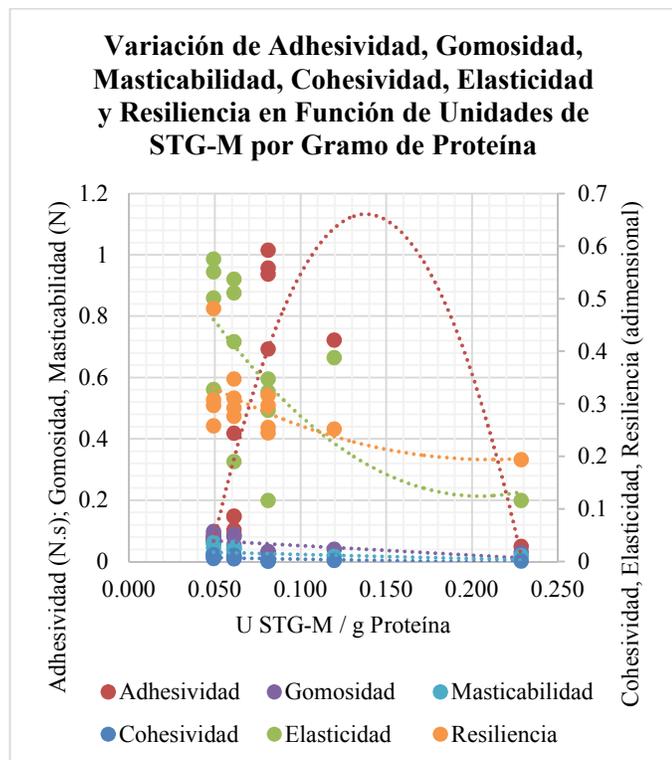


Figura 13. Resumen de resultados, resiliencia del pan.

Se realizó una correlación de los valores del perfil de textura en relación a las unidades de STG-M (figura 14), donde se muestra un máximo en el modelado potencial de la adhesividad al sustituir harina de trigo por almidón de yuca por encima del 60%; el resto de las propiedades graficadas decrecen al incrementarse el

recuento de unidades de enzima transglutaminasa por gramo de proteína calculado para cada formulación.



**Figura 14.** Correlación de atributos de textura en función de unidades de STG-M/gramo de proteína.

#### 4. Conclusiones

El almidón agrio de yuca ha demostrado ser un sustrato pobre para la actividad de la enzima TG. La sustitución parcial de harina de trigo por almidón agrio de yuca es viable realizarla en un 20%. En estas muestras se midió un incremento en el volumen específico, indicador de mayor retención de gas durante el desarrollo de la masa originando una fracción alveolar conforme en las muestras con 20% de sustitución de harina de trigo que apenas disminuyó un 2.77% de la muestra control.

El uso de enzima transglutaminasa como mejorador de la estructura de la miga del pan es notorio al ser empleado en formulaciones dentro del rango de 0.01% y 0.02% por encima del peso de harinas y almidones. Entre las principales ventajas observadas y analizadas se encontraron: uniformidad en la distribución alveolar de la miga, se logró una estructura más resistente al desarrollo de la masa y mayor retención de gas de la que deriva un volumen en el producto final aceptable.

En función de un incremento en las unidades de STG-M por gramo de proteína los atributos de textura analizados mantienen un comportamiento distinto: la dureza y la fracturabilidad aumentan; por su parte la masticabilidad, gomosidad y cohesividad disminuyen linealmente mientras que la elasticidad y resiliencia modelan un descenso polinomial.

#### 5. Agradecimiento

La empresa Riba Smith en Panamá proporcionó el acceso para el uso de sus instalaciones de la planta artesanal de pan. La empresa Ajinomoto donó gentilmente la enzima TGA utilizada para este estudio. En los laboratorios de Química Analítica de los laboratorios de la Facultad de Ciencias y Tecnología de UTP se llevaron a cabo los análisis fisicoquímicos, contando con la colaboración del Lic. Alejandrino Sevillano. El Centro de Producción e Investigaciones Agroindustriales (CEPIA) de UTP facilitó el uso del texturómetro para los análisis de textura instrumental, con la colaboración de la Ing. Kesia Barrows. Muchas gracias por el apoyo de estos colaboradores, empresas y Centro.

Actualmente la Dra. Franco es miembro del Sistema Nacional de Investigación-SNI- en la República de Panamá, bajo la Secretaria Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT).

#### 6. Referencias

- [1] Guía técnica para la producción y análisis del almidón de yuca. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a1028s/a1028s02.pdf> [Consulta: 17 de agosto de 2014].
- [2] O. Tewe. "The global cassava development strategy. Cassava for livestock feed in sub-Saharan Africa". FAO Rome Forum. 2004.
- [3] C. Collar, C. Bollain y A. Angioloni. "Significance of microbial transglutaminase on the sensory, mechanical and crumb grain pattern of enzyme supplemented fresh pan breads". Journal of Food Engineering, vol. 70, pp. 479-488, October 2005.
- [4] M.E. Steffolani, P.D. Ribotta, G.T. Pérez, y A.E. León. "Effect of glucose oxidase, transglutaminase, and pentosanase on wheat proteins: Relationship with dough properties and bread-making quality". Journal of Cereal Science, vol. 51, pp. 366-373, May 2010.
- [5] J. Rossi Marquez, P. Di Pierro, M. Esposito, L. Mariniello, y R. Porta. "Application of transglutaminase-crosslinked whey protein/pectin films as water barrier coatings in fried and baked foods". Food Bioprocessing Technology, vol. pp. 447-455, February 2014.
- [6] AACC International. Approved Methods of Analysis. 11 ed. Method 10-05.01. Guidelines for Measurement of Volume by Rapeseed Displacement. 2000. AACC International, St. Paul, MN, U.S.A.

- [7] A. Pizzinato. “Qualidade da farinha de trigo: conceito, factores determinantes, parâmetros de avilacao, e controle”. Apostila de curso. Chocotec-ITAL, Campinas, 1997.
- [8] M. Moore, M. Heinbockel, P. Dockery, H. M. Ulmer, y E. Arendt, E. “Network Formation in Gluten-Free Bread with Application of Transglutaminase”. *Cereal Chemistry*, vol. 83, pp. 28-36, February 2006.
- [9] M. Mohammadi, M.H. Azizi, T.R. Neyestani, H. Hosseini, y A.M. Mortazavian. “Development of gluten-free bread using guar gum and transglutaminase”. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 21, pp. 1398-1402, January 2015.
- [10] S. Jensen, L. Skibsted, U. Kidmose, and A. Thybo, “Addition of cassava flour in bread-making: sensory and textural evaluation”. *LWT-Food Science and Technology*, vol. 60, pp. 292–299, January 2015.
- [11] C. Onyango, C. Mutungui, G. Unbehend, M. Lindhauer. “Rheological and baking characteristics of batter and bread prepared from pregelatinised cassava starch and sorghum and modified using microbial transglutaminase”. *Journal of Food Engineering*, vol. 97, pp. 465-470, April 2010.
- [12] J. Smerdel, L. Pollak, D. Novotni, N. Cukelj, M. Benkovic, D. Lusic y D. Curic. “Improvement of gluten-free bread quality using transglutaminase, various extruded flours and protein isolates”. *Journal of Food and Nutrition Research*, vol. 51, pp. 242-253, December 2011.
- [13] M.T.P.S. Clerici, C. Airoidiu, y A.A. El-Dash. “Production of acidic extruded rice flour and its influence on the quality of gluten-free bread”. *LWT – Food Science and Technology*, vol. 42, pp. 618–623, March 2009.
- [14] J.A. Gerrard, S.E. Fayle, A.J. Wilson, M.P. Newberry, M. Ross y S. Kavale. “May Dough Properties and Crumb Strength of White Pan Bread as Affected by Microbial Transglutaminase”. *Journal of Food Science*, vol. 63, pp. 472–475, May 1998.